

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Estudi d'un sistema autosuficient de generació elèctrica basat  
en energies renovables a un poble del Prepirineu català**

### **MEMÒRIA**

**Autor:**  
**Director:**  
**Codirector:**  
**Convocatòria:**

Oriol Yglesias i Jiménez  
Bruno Domenech Lega  
Alejandro López-González  
Juny 2019



**Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**





## Resum

Aquest treball desenvolupa un estudi tècnic i de viabilitat econòmica de la implementació d'una xarxa de generació elèctrica aïllada alternativa a la xarxa convencional, al poble de Beuda (Girona). L'objectiu principal és l'estudi de la configuració òptima dels elements necessaris, prioritzant l'ús d'energies renovables, per aconseguir un subministrament ininterromput i un baix nivell d'emissions. Beuda és un municipi de la Garrotxa, format per quatre nuclis que seran tractats com a càrregues independents en el disseny del sistema.

La metodologia emprada per al disseny de la xarxa consta de tres etapes: l'estudi preliminar, l'aplicació de paquets informàtics i l'avaluació del resultat. A l'estudi preliminar, primer s'analitza la demanda elèctrica domèstica a Beuda, per a poder calcular la demanda a cada un dels nuclis. Seguidament es realitza l'avaluació dels recursos solar i eòlic, per a determinar la generació elèctrica que el sistema podrà produir. En l'aplicació dels paquets informàtics, l'optimització del model es realitza amb el software especialitzat HOMER Energy, amb el qual es simula el funcionament del sistema durant totes les hores de l'any per a determinar la millor combinació de generadors per cobrir la demanda a mínim cost. L'avaluació dels resultats es realitza amb el mateix programa HOMER, duent a terme un anàlisi de sensibilitat per determinar els efectes de variacions en la demanda i en els recursos energètics sobre el rendiment del sistema final.

Els resultats mostren que les quatre instal·lacions dels quatre nuclis de població tenen la mateixa configuració, formada per plaques solars fotovoltaïques, un generador dièsel auxiliar, inversors i bateries de suport. El cost final de les microxarxes és elevat pel fet de necessitar una gran quantitat de bateries amb l'objectiu d'assegurar un subministrament constant; i el cost de l'energia final produïda és similar al de la xarxa elèctrica nacional. A canvi, s'aconsegueixen unes emissions associades de gasos d'efecte hivernacle molt inferiors.

Aquest estudi serveix, per una banda, com a anàlisi preliminar per a la possible desconexió de la xarxa nacional per part del municipi de Beuda. Per altra banda, és una mostra de com és possible anar transformant la matriu energètica en solucions més eficients i netes, en línia amb els objectius de desenvolupament sostenible.



# Sumari

<b>SUMARI</b>	<b>5</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>7</b>
1.1. Origen del projecte .....	7
1.2. Motivació .....	7
1.3. Hipòtesi.....	7
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>9</b>
2.1. Objectius del projecte .....	9
2.2. Abast del projecte.....	9
2.3. Contribució del projecte.....	10
<b>3. MARC TEÒRIC</b>	<b>11</b>
3.1. La xarxa elèctrica convencional .....	11
3.1.1. Generació .....	11
3.1.2. Origen de l'electricitat consumida .....	13
3.1.3. Impacte de l'electricitat consumida a la xarxa convencional .....	14
3.2. Micro-xarxes elèctriques aïllades .....	15
3.2.1. Generadors.....	16
3.2.2. Inversors .....	16
3.2.3. Bateries.....	16
3.2.4. Control .....	17
3.3. Recursos energètics renovables .....	18
3.3.1. Recurs solar.....	19
3.3.2. Recurs eòlic .....	26
3.4. Recursos energètics no renovables .....	30
3.4.1. Gas Natural.....	31
<b>4. PROCÉS DE DISSENY DE PROJECTES D'ELECTRIFICACIÓ</b>	<b>32</b>
4.1. Procediment .....	32
4.1.1. Treball preliminar i de camp .....	33
4.1.2. Paquets informàtics .....	34
4.1.3. Avaluació de resultats i sensibilitat .....	34

4.2. HOMER.....	35
<b>5. CAS D'ESTUDI .....</b>	<b>38</b>
5.1. Beuda.....	38
5.2. Identificació de les dades de demanda i els recursos energètics .....	40
5.2.1. Càlcul del perfil horari de demanda.....	40
5.2.2. Anàlisi dels recursos .....	42
5.3. Proposta integral d'electrificació .....	51
5.3.1. Beuda .....	52
5.3.2. Lligordà .....	53
5.3.3. Palera .....	55
5.3.4. Segueró .....	56
5.4. Anàlisi de sensibilitat.....	57
5.4.1. Anàlisi de sensibilitat de la demanda .....	57
5.4.2. Anàlisi de sensibilitat dels recursos energètics .....	59
5.5. Estudi econòmic.....	59
<b>6. PRESSUPOST .....</b>	<b>62</b>
6.1. Costos de la realització del projecte .....	62
6.2. Estudi de viabilitat del projecte.....	64
<b>7. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL I SOCIAL .....</b>	<b>66</b>
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>67</b>
<b>AGRAÏMENTS .....</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>71</b>
Referències bibliogràfiques .....	71

# 1. Prefaci

En aquest capítol es detalla breument l'origen del projecte, la motivació per realitzar-lo i, finalment, les hipòtesis necessàries per dur-lo a terme.

## 1.1. Origen del projecte

El projecte respon a una iniciativa del municipi de Beuda (Girona), i la seva voluntat de buscar una alternativa d'autosuficiència energètica. Malgrat la disposició de l'ajuntament, la implementació s'ha endarrerit i el projecte es troba pendent d'aprovació.

## 1.2. Motivació

Vivim en un moment d'emergència climàtica en què la pol·lució causada pels combustibles utilitzats per a l'obtenció d'energia en són la principal causa. Aquesta pol·lució emesa està formada en gran part per gasos d'efecte hivernacle (diòxid de carboni, metà, òxid de dinitrogen, ozó i clorofluorocarboni), que dificulten l'escapament de la radiació solar incident a la terra causant així l'escalfament global.

El sector energètic està canviant, encara que de forma gradual, adaptant-se a les noves possibilitats de generació. La meua motivació doncs, resideix en el desafiament del futur del sector energètic i la descarbonització de l'economia.

Sempre he tingut un gran interès en les energies renovables. En el plantejament d'un tema per a elaborar el Treball de Fi de Grau, vaig considerar que seria una bona oportunitat per ampliar i aprofundir més sobre l'àmbit, tot aplicant els coneixements adquirits durant el grau en assignatures com Electrònica, Mecànica de Fluids o Optimització i Simulació, entre d'altres.

## 1.3. Hipòtesi

Aquest treball es centrarà específicament en l'estudi de la millor opció d'electrificació del municipi, sense arribar a aprofundir en la instal·lació ni aplicació de l'opció òptima trobada.

Ha de tenir-se en compte que durant la realització de l'estudi s'ha tingut dificultats per

accedir a determinades dades, necessàries per a realitzar l'estudi. Per aquesta raó, s'ha procedit a fer simplificacions i hipòtesis pertinents per aconseguir un resultat factible.



## 2. Introducció

L'ajuntament del municipi de Beuda va aprovar una iniciativa per avaluar la possibilitat d'una eventual desconexió de la xarxa elèctrica convencional i implementar una microxarxa aïllada, basada en energies renovables, per aconseguir l'autonomia energètica de forma sostenible.

L'objecte del treball és l'estudi de les possibilitats energètiques del municipi, tot avaluant els recursos disponibles per trobar la millor combinació de dispositius per al disseny d'una microxarxa elèctrica, alimentada en gran percentatge per energies renovables.

### 2.1. Objectius del projecte

Per dur a terme l'objectiu principal del treball, caldrà assolir els següents objectius específics:

- Realitzar un estudi de les fonts energètiques renovables disponibles, per donar a la microxarxa el màxim grau d'autonomia. Concretament, s'avaluarà el recurs solar i el recurs eòlic, tot emprant softwares especialitzats com OpenWind per al cas del recurs eòlic o bases de dades públiques (com les d'IRENA) per al cas del recurs solar. D'altra banda, es realitzarà l'avaluació dels combustibles fòssils per determinar el que menor impacte ambiental té.
- Fer un estudi de la demanda energètica per definir les necessitats de producció. Es realitzarà mitjançant un perfil de demanda sintètic, basant-se en les dades de consum elèctric estadístiques i en el tipus d'habitatges.
- Analitzar els resultats i la sensibilitat del sistema. Caldrà fer un balanç energètic i econòmic (amb el software HOMER) per determinar la viabilitat del projecte, i estudiar la sensibilitat d'aquest enfront de canvis en la demanda elèctrica i en els recursos energètics.

### 2.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte ha prioritzat l'estudi de la combinació òptima de tecnologies dels sistemes de generació elèctrica del municipi de Beuda, sense aprofundir en l'estudi de la

instal·lació de les tecnologies ni la distribució de les mateixes en el terreny.

Per a realitzar aquest projecte s'ha emprat programari especialitzat, com el software HOMER Energy el qual ha estat l'eina bàsica per a l'optimització de les microxarxes i l'anàlisi de sensibilitat.

Per a l'adquisició de les dades dels recursos energètics, s'ha triat bases de dades que asseguressin gran precisió. En el cas del recurs solar també s'ha utilitzat HOMER Energy, que mitjançant les coordenades introduïdes, obté automàticament les dades ofertes per la NASA. En el cas del recurs eòlic s'ha emprat el software OpenWind, que utilitza dades d'estacions meteorològiques pròximes i la topografia de la zona d'estudi per obtenir les característiques del vent.

## **2.3. Contribució del projecte**

Aquest projecte contribueix a la determinació que l'autoabastiment energètic en el municipi de Beuda és possible. A més, aquest tindrà un impacte mediambiental inferior al subministrament elèctric actual.

Per a demostrar-ho, s'ha realitzat una optimització del model de microxarxa, per determinar la seva configuració més adient, mitjançant el programa HOMER Energy. Per a definir el model ha estat necessari introduir-hi les dades relacionades amb la demanda elèctrica i els recursos disponibles.

L'estudi de la demanda elèctrica domèstica dels habitatges de Beuda s'ha realitzat mitjançant la creació d'un perfil de demanda sintètic, basat en les dades oficials i adequat per al tipus d'habitatge i per al tipus d'ús. En el cas de l'avaluació dels recursos energètics s'ha realitzat amb programes especialitzats, amb els quals s'ha pogut definir de forma precisa.

En el supòsit que el municipi decidís realitzar el projecte, aquest treball podria ser una bona base per definir les capacitats i limitacions d'una microxarxa aïllada. El model proposat és també una bona mostra per altres municipis amb interès en impulsar un canvi en el seu model de consum elèctric cap a una matriu energètica més sostenible.

### 3. Marc teòric

En aquest apartat es troba recollida la informació necessària per entendre i contextualitzar el treball. En aquest es descriu i es detalla el funcionament de la xarxa elèctrica convencional, es descriu la microxarxa i s'identifiquen els seus components, i finalment es parla de forma detallada sobre els recursos energètics, la seva procedència i la tecnologia per a la generació elèctrica.

#### 3.1. La xarxa elèctrica convencional

La xarxa elèctrica convencional subministra l'energia demandada pels consumidors. Aquest procés consta de tres etapes: generació, transmissió i distribució.

L'electricitat es produeix en zones allunyades de les grans ciutats, usualment a prop del punt d'extracció del recurs utilitzat. Es transporta per la xarxa de transmissió, gestionada per l'Estat, a alta tensió (400kV) fins a les estacions transformadores que passen d'alta tensió a mitjana o baixa depenent de les necessitats del consumidor. La xarxa de distribució és gestionada per diferents operadors privats que s'encarreguen de que arribi fins a l'usuari final (usualment a 220V).

##### 3.1.1. Generació

La producció elèctrica subministrada a la xarxa prové de l'anomenat mix elèctric. La generació d'aquest ha de ser sempre igual a la demanda per tal de no sobrecarregar-la. Aquesta demanda varia amb el temps, i les variacions es poden observar a diferents magnituds de temps: dècimes de segon, segons, hores, dies, estacions de l'any i entre anys. Tot i poder esperar tendències en el consum, és impossible predir el comportament de la demanda. Com es pot observar a la figura 3.1, la generació elèctrica reparteix en dos grups l'alimentació de la xarxa, en diferents règims: la càrrega base (*"base load"*) i la flexible.

La càrrega base és fixa i cobreix l'electricitat consumida fins al punt de mínima demanda. És la zona de producció on usualment es troba l'energia nuclear (per tenir inèrcies molt grans) i

les renovables (perquè la seva producció no és controlable).

En canvi, la zona de càrrega flexible canvia tota l'estona i es necessiten generadors que siguin capaços de regular la seva producció amb facilitat. Per aquesta raó es fan servir generadors de combustible fòssil, que poden oferir una millor resposta a canvis de producció sobtats.

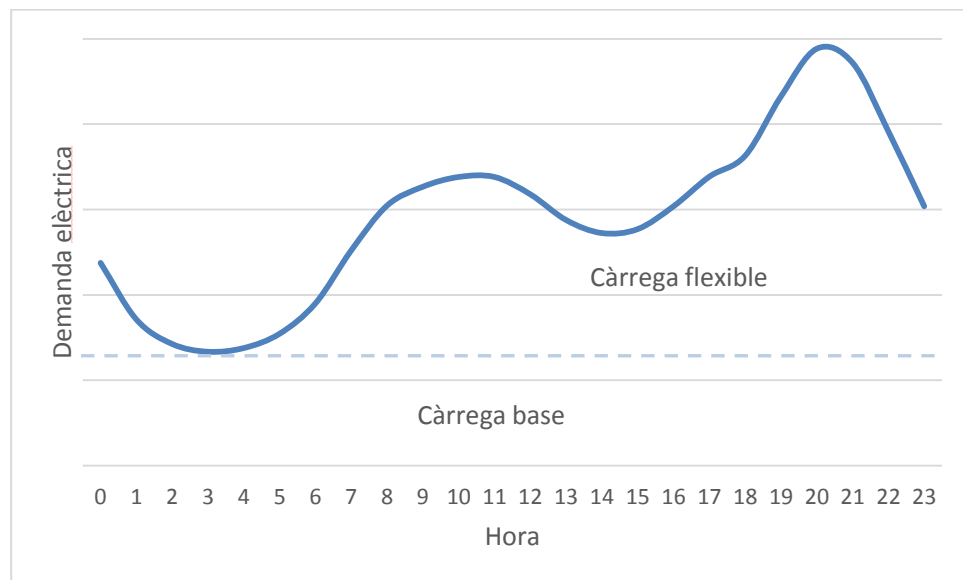


Fig. 3.1 Demanda elèctrica horària

Les tecnologies disponibles per a la producció s'ordenen segons el "merit order" (ordre de mèrit), que les ordena de forma ascendent en funció del seu cost marginal. Tal com pot observar-se a la figura 3.2, a la fase de generació base podem trobar les tecnologies més barates i progressivament s'aniran utilitzant tecnologies cada cop més cares per a poder suplir la demanda. Tal com mostra la figura, coincideix en que les tecnologies més barates són també les menys controlables, i per tant les que formen part de la càrrega base. Per aquest motiu el cost del consum elèctric del client pot dependre de la franja horària a la qual s'ha consumit.

Les xarxes elèctriques de cada país, també tenen la possibilitat de vendre o comprar electricitat als seus països veïns, per gestionar els excessos o els dèficits de càrrega.

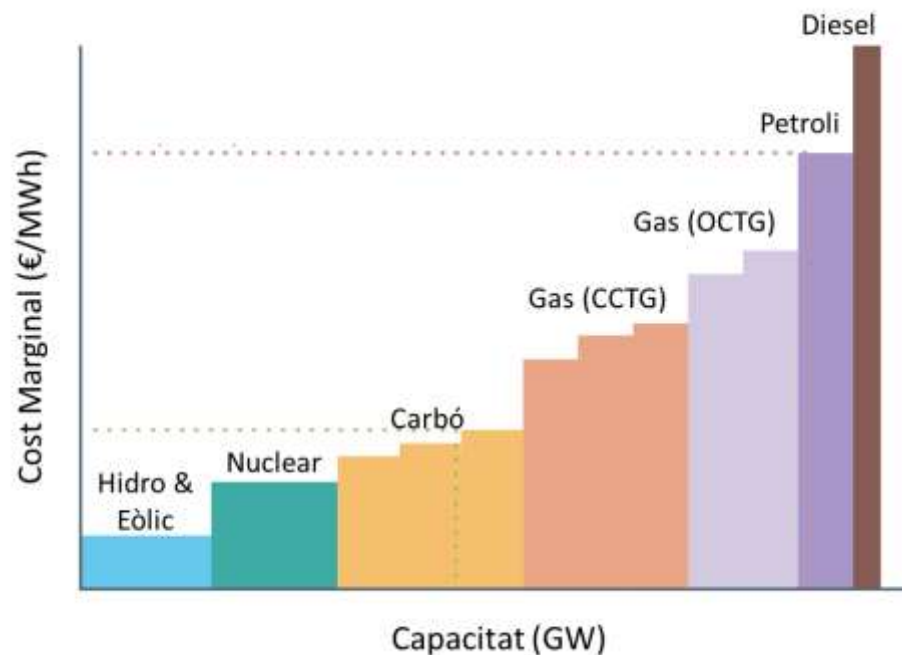


Fig. 3.2 Ordre de mèrit [11]

### 3.1.2. Origen de l'electricitat consumida

L'electricitat consumida a l'estat espanyol (Fig. 3.3) és encara majoritàriament d'origen no renovable, predominant-hi la generació nuclear, el cicle combinat (de gas natural) i la generació tèrmica (de combustible fòssil o carbó mineral).

L'energia renovable representa només el 38% del total, i com es pot observar a la figura 3.4, prové principalment de generació hidroelèctrica i eòlica. Tot i tenir un gran recurs solar, tant sols un 2,66% és generat mitjançant plaques fotovoltaïques i un 1,52% mitjançant centrals d'energia solar tèrmica. Altres tipus de generació, com la generació tèrmica renovable (amb biomassa o residus sòlids urbans) representen un 1,9%.

L'estat espanyol importa un 5,4% del consum anual total, provinent de França i Portugal, i també exporta a Andorra i al Marroc, amb un saldo total d'importació del 4.1% [17]

### Origen de l'electricitat nacional

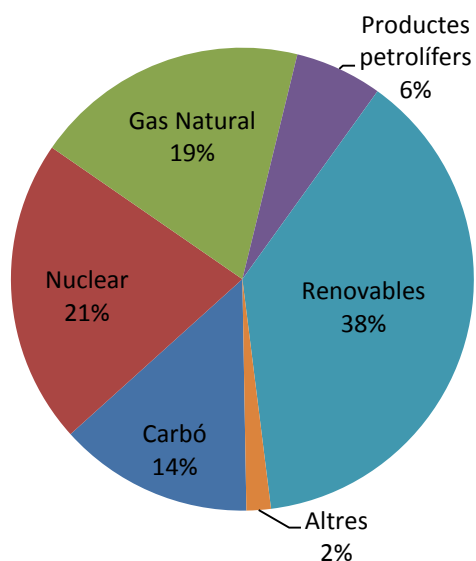


Fig. 3.3 Origen de l'electricitat nacional [16]

### Origen de l'electricitat renovable nacional

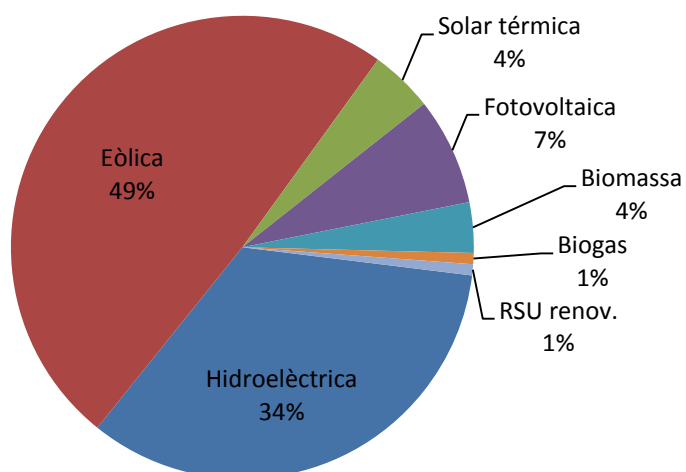


Fig. 3.4 Origen de l'electricitat renovable nacional [16]

#### 3.1.3. Impacte de l'electricitat consumida a la xarxa convencional

Segons les dades ofertes per l'IDAE, el coeficient de CO<sub>2</sub> emès per l'electricitat nacional

peninsular és 0,372 kg CO<sub>2</sub>/kWh elèctric. Aquesta contaminació és conseqüència del mix elèctric i representa la mitjana de les diferents companyies elèctriques.

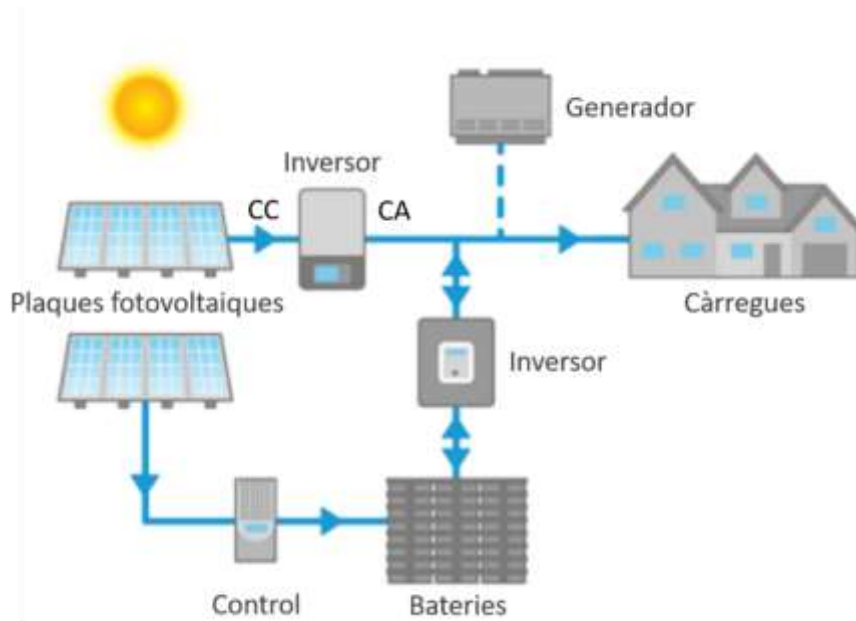
Les emissions de CO<sub>2</sub> no són l'únic índex per a calcular l'impacte de l'energia. Les centrals tèrmiques de combustió (de combustibles fòssils) generen 0,366 g/kWh elèctric de diòxid de sofre (SO<sub>2</sub>) i 0,261 g/kWh elèctric de òxid de nitrogen (NO<sub>x</sub>). Ambdós gasos són altament contaminants, el diòxid de sofre per ser el causant de la pluja àcida i els òxids de nitrogen per contribuir a l'efecte hivernacle i per tenir efectes adversos per la salut.

### 3.2. Micro-xarxes elèctriques aïllades

Una microxarxa és un conjunt de càrregues i generadors elèctrics interconnectats entre si que opera amb una corrent idèntica a la subministrada per la xarxa, normalment en baixa tensió. En el cas de ser aïllada, serà autosuficient generant l'electricitat demandada. És habitual trobar-ne en ambients rurals on l'electrificació convencional de la zona, per motius geogràfics i/o topogràfics, presenta dificultats i un gran cost.

La generació pot aconseguir-se mitjançant diferents fonts energètiques, les quals acostumen a ser renovables amb generadors de combustible fòssil com a suport, o connexió a la xarxa si n'hi ha.

Com mostra la figura 3.5, els components bàsics que poden distingir-se a les micro-xarxes són els generadors renovables (en aquest cas plaques fotovoltaïques), els inversors, les bateries, el generador auxiliar, el control i finalment les càrregues. Les plaques fotovoltaïques generen electricitat en forma de corrent continu, que el controlador decidirà si ha de carregar les bateries o si ha d'alimentar la càrrega (directament en corrent continu). En el cas d'anar cap a la càrrega, l'electricitat passa per l'inversor per passar de corrent continu a corrent altern, adequant-la així per al seu consum. En cas de tenir un nivell de càrrega de les bateries inferior al 80%, i no tenir prou recurs solar, el generador s'encén per alimentar el circuit (directament en corrent altern).



*Fig. 3.5 Esquema d'una microxarxa*

### 3.2.1. Generadors

Els generadors d'una microxarxa tenen la funció d'alimentar-la per poder subministrar l'electricitat demandada pels consumidors. Poden ser de generació renovable, com en el cas de les plaques solars o els aerogeneradors, o no renovables, com els de dièsel o gas natural. L'elecció d'aquests dependrà dels recursos energètics de l'emplaçament de la instal·lació.

### 3.2.2. Inversors

L'electricitat dels generadors pot ser produïda tant en corrent continu com en altern, i en la majoria de casos no és apta per al consum directe. Per aquesta raó, s'instal·len inversors per a modificar la corrent generada per obtenir corrent altern que concordi amb la de la xarxa en freqüència i amplitud.

### 3.2.3. Bateries

Qualsevol xarxa elèctrica ha de ser capaç de respondre davant de diferents canvis de demanda amb rapidesa. La naturalesa dels generadors de suport que podem trobar a la instal·lació (generadors de combustible fòssil, hidroelèctrics, piles d'hidrogen...) tenen un



temps de resposta de l'ordre de desenes de segons, per la qual cosa no són capaços d'assumir aquestes variacions. El banc de bateries no només emmagatzema l'energia per el consum en moments de baixa o nul·la producció sinó que té un important paper a l'hora de compensar les mancances elèctriques puntuals del subministrament.

Les bateries que es fan servir són específiques per a energies renovables. Per a mantenir la vida útil de la bateria han de mantenir-se sempre per sobre del 80% de la capacitat de càrrega (SOC) per tal de mantenir un nombre de cicles elevat.

Depth of Discharge (%)	Cycles to Failure
20	7,820
30	4,960
40	3,600
50	2,780
60	2,270
70	1,930
80	1,640

*Fig. 3.6 Vida útil de les bateries*

Com es pot observar a la taula anterior (Fig 3.6), la vida útil de la bateria es redueix exponencialment amb el percentatge descarregat. Per això, idealment es calcula el nombre de bateries per aconseguir una capacitat elèctrica 5 cops la demanda elèctrica diària procedent de bateries que es consumirà en un dia d'alt consum.

### **3.2.4. Control**

El control s'encarrega de gestionar la producció, l'emmagatzematge de les bateries i el consum de la xarxa. S'instal·la a la sortida del generador i determina quin ha de ser l'ús de l'energia generada, si ha d'anar a les bateries o si ha d'anar a alimentar a la xarxa. En el cas de dèficit energètic també s'encarrega d'encendre el generador de suport o de connectar el sistema a la xarxa.

### 3.3. Recursos energètics renovables

Els recursos energètics renovables, són aquells que provenen de fonts idealment inesgotables i son (o es consideren) neutres a les emissions de diòxid de carboni. Es consideren energies renovables l'energia eòlica, la solar (fotovoltaica o termoelectrica), la hidroelèctrica (amb presa o "run of river"), la mareomotriu, la geotèrmica i la biomassa.

L'energia hidroelèctrica, transforma l'energia potencial transmesa per l'aigua en energia elèctrica. La variant més comú s'instal·la a preses i mitjançant canalitzacions del salt d'aigua es mou turbines elèctriques. Aquesta variant, permet bombejar l'aigua cap a munt de nou quan hi ha excedents elèctrics per utilitzar-la a les hores de més demanda i menys producció.

A part de la hidroelèctrica convencional, també existeix la hidroelèctrica "run of river", que no precisa d'una presa. Aquesta, canalitza una part de l'aigua del riu i la condueix cap a la turbina elèctrica. Al no tenir una reserva d'aigua, fa que aquesta tecnologia no sigui controlable, però també que tingui un impacte mediambiental molt més petit.

L'energia mareomotriu és també un tipus d'energia hidroelèctrica que aprofita les corrents generades per les marees. És bastant predictable però factors com la climatologia o el vent poden canviar les corrents. No és massa comuna ja que hi ha altres tecnologies més senzilles i econòmiques.

També trobem l'energia geotèrmica, un recurs que aprofita la temperatura de punts calents de l'interior de la terra. En llocs amb alta activitat volcànica on es poden aconseguir altes temperatures, com en el cas d'Islàndia, pot produir-se electricitat escalfant aigua i fent-la servir en turbines de vapor.

La biomassa consisteix en l'extracció d'energia de la combustió de matèria orgànica. Usualment s'utilitza en situacions on es poden aprofitar residus agrícoles. A partir de la biomassa (i fangs d'estacions depuradores), es produeixen altres combustibles com el biogàs, compost principalment per metà, utilitzat com a substitutori dels combustibles fòssils. Tot i ser considerades fonts d'energia neutres a l'emissió de diòxid de carboni, la seva combustió allibera tant diòxid de carboni com òxids de nitrogen.

L'energia solar i eòlica es detallen a continuació als punts 3.3.1 i 3.3.2, al ser les estudiades en aquest treball.



### 3.3.1. Recurs solar

#### Irradiància

El sol és el principal recurs energètic de la terra, l'energia del qual ens arriba en gran part en forma de radiació electromagnètica. Aquesta es crea al sol a partir a les fusions nuclears que es produeixen al seu nucli com a conseqüència de la pressió gravitacional de la seva massa i les altes temperatures derivades.

El sol està compost per un 71% de hidrogen, 27% d'heli i 2% d'altres elements. Durant el procés de fusió l'hidrogen es crema produint heli, que emet radiació electromagnètica des del nucli fins la superfície. Aquest procés de combustió eleva la temperatura de la capa més exterior fins als 5777 °K.

La radiació rebuda a la terra és l'anomenada radiació tèrmica. Aquesta, és emesa per qualsevol element o substància pel simple fet de tenir temperatura i comprèn a la regió de l'espectre electromagnètic entre 0.2µm fins als 1000µm. La Llei de Planck permet descriure la distribució de la irradiància emesa (també anomenat poder emissiu) per un cos opac en funció de la seva longitud d'ona. És descrita per la següent equació:

$$e_{\lambda,T} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \text{ W/m}^2\mu\text{m} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$c_1 = 3,7427 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$c_2 = 1,4388 \times 10^4 \mu\text{mK}$$

T en °K, λ en µm (longitud d'ona)

En el cas del sol, la major part de l'energia irradiada és rebuda en la regió de l'espectre compresa entre 250 nm i 3000 nm, tal com s'observa a la figura inferior.

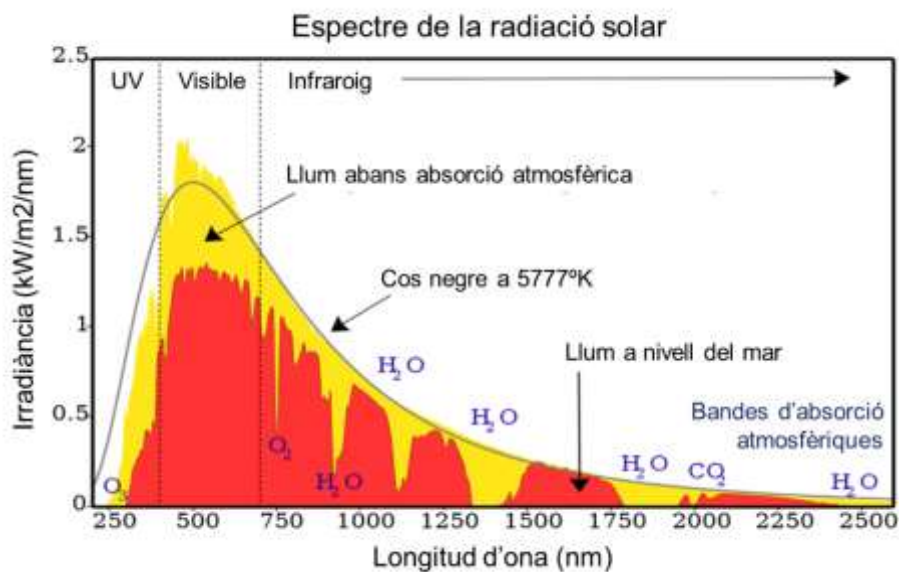


Fig. 3.7 Espectre de la radiació solar

A partir de la Llei de Planck (Eq. 3.1), que proporciona la distribució espectral de la irradiància (potència), integrant-la obtenim la irradiància total emesa a una temperatura determinada (energia). L'equació obtinguda s'anomena la Llei de Stefan-Boltzmann:

$$e_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1)} d\lambda = \sigma T^4 (W/m^2) \quad (Eq. 3.2)$$

Sent  $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$  la constant de Boltzmann.

Com es pot observar, la irradiància només depèn de la temperatura del cos i augmenta a la exponencial quarta de la temperatura en Kelvin.

### Moviment de la terra

La terra gira sobre el seu propi eix fent una rotació completa cada 24 hores i a la vegada orbita al voltant del sol realitzant una volta cada 365,25 dies. L'òrbita al voltant del sol no segueix una trajectòria circular sinó el·líptica, trobant-se el sol a un dels focus. Tot i tenir una excentricitat molt petita ( $e=0,01673$ ), la distància entre la terra i el sol canvia donant lloc al periheli (distància més curta) el 3 de gener i el afeli (distància més llarga) el 4 de juliol. Aquesta distància queda perfectament descrita per l'equació de Garg (1982):

$$R = a(1 \pm e) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Sent  $a = 1 \text{ U.A.} = 149,5985 \cdot 10^6 \text{ km}$  i e l'excentricitat.

Aquesta distància varia un 3,3% entre el periheli i l'afeli, la qual cosa té poca influència entre els canvis estacionals de temperatura i irradiància. El principal canvi es produeix per la posició relativa del sol al cel, que ve donada per la declinació.

L'eix de rotació de la terra està inclinat  $23,45^\circ$  respecte la normal de l'òrbita de forma constant. La declinació solar ( $\delta$ ) és la variació angular entre el sol al migdia (al passar per el meridià local) i el pla de l'equador celeste. Pot ser positiu o negatiu segons l'època de l'any i va dels  $23,45^\circ$  al solstici d'estiu fins als  $-23,45^\circ$  al solstici d'hivern.

Segons Cooper (1969) y ASHRAE (2007), la declinació pot obtenir-se com:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

On n fa referència al dia de forma ordinal.

Tal com s'observa a la figura posterior, que representa gràficament la declinació (Eq 3.4), aquesta sé el punt més baix el 21 de desembre (dia ordinal 355) i el seu punt més alt el 21 de juny (dia ordinal 172).

La declinació, farà variar de formes diferents la incidència solar durant l'any depenent del tròpic. Com es pot observar a la figura següent, les latituds corresponents als tròpics de Càncer i Capricorn tindran el sol en el seu punt més alt al solstici d'estiu (a l'hemisferi nord) o al solstici d'hivern (a l'hemisferi sud). De la mateixa manera al Cercle Antàrtic tindrà llum tot el dia durant el solstici d'estiu mentre que el cercle Àrtic no en tindrà.

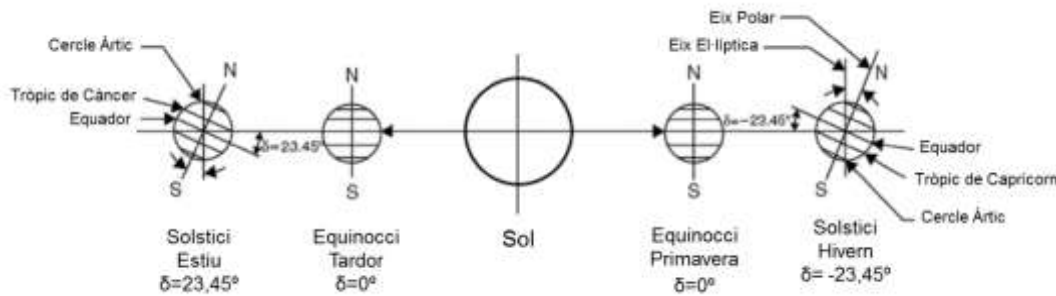


Fig. 3.8 Declinació solar

### Constant solar

Es defineix la constant solar com la quantitat d'energia en forma de radiació per unitat de temps i superfície que arriba a l'exterior de l'atmosfera considerant una atenuació nul·la a l'espai. Com la distància entre la terra i el sol canvia cada dia, es considera  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  la constant solar mitjana, quan la distància entre la terra i el sol és de 1 U.A. (radi mitjà). Es podrà calcular la constant solar diària multiplicant el valor mitjà per el factor proporcional a la variació de la distància que la farà oscil·lar en un rang del  $\pm 3\%$ .

$$G_{0,n} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \text{ W/m}^2 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

On n és el dia de l'any.

Existeixen altres factors que causen fluctuacions a l'energia emesa pel sol, com les tempestes solars, que per raons de la seva pròpia naturalesa no poden ser estimades de forma precisa. Tot i això, ha quedat demostrat per els estudis realitzats que aquestes fluctuacions no generen canvis superiors al 0,2% en la radiació emesa.

### Absorció i dispersió a l'atmosfera

L'energia que arriba a la superfície de la terra és molt inferior a la que arriba a l'atmosfera. Aquest fet es deu als processos d'atenuació solar, causats per l'absorció i la dispersió de la radiació.

L'absorció és la transferència d'energia de la radiació solar cap a les partícules

atmosfèriques, principalment l'O<sub>3</sub>, l'H<sub>2</sub>O i el CO<sub>2</sub>. Cada tipus de partícula reté la radiació compresa dins d'un rang de longitud d'ona.

La dispersió és la difusió de la radiació solar causada per la interacció amb partícules o molècules. Els factors més determinants són el gruix de la capa d'ozó, massa total d'aire, les partícules suspeses a l'atmosfera i la cobertura de núvols que els raigs han de travessar.

S'utilitza l'Índex de claredat per determinar la fracció de radiació rebuda a la superfície en comparació a la total que arriba a l'atmosfera. Els seu valor varia segons l'estació de l'any i acostuma a trobar-se en el rang entre 0,25 (un dia molt ennuvolat) i 0,75 (un dia amb el cel totalment clar).

### Components de la radiació solar

La irradiància (G) és la potència radiant del sol que és rebuda sobre una superfície determinada, ja sigui difusa o directa. Aquesta, està formada per la irradiància directa i la difusa, tal com pot observar-se al gràfic. .

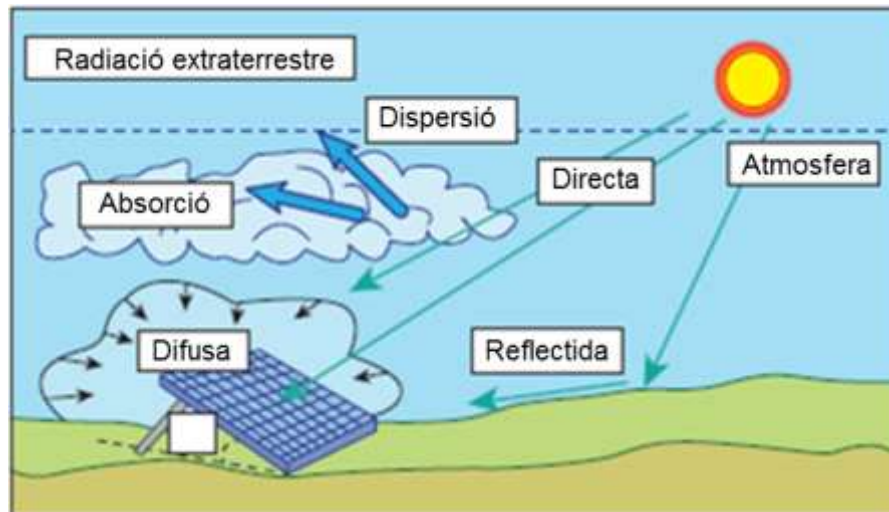


Fig. 3.9 Absorció i dispersió

La irradiància directa (G<sub>b</sub>) és la que arriba a la superfície terrestre des del sol sense haver estat dispersada a l'atmosfera. Té la mateixa direcció que normal de la superfície del sol des d'on ha estat irradiada. Per aquest motiu, dependrà de la inclinació entre la superfície d'impacte i la direcció dels rajos solars.

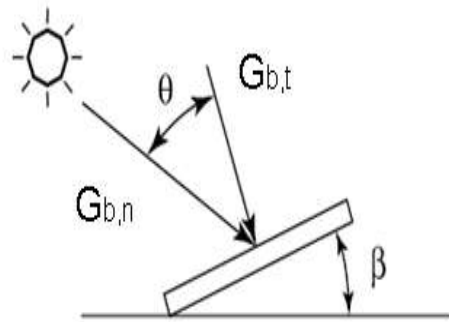


Fig. 3.10 Elevació solar

L'angle d'elevació solar  $\theta$  (Fig. 3.10) va canviant durant el dia. Per aquest motiu, els panells de captadors solars s'instal·len amb la inclinació  $\beta$ , per compensar la latitud i aprofitar al màxim la seva superfície.

La irradiància difusa ( $G_d$ ) és la que arriba a la superfície terrestre havent estat dispersada per l'atmosfera. Aquesta, deixa de tenir una direcció concreta i arriba a la superfície en totes direccions.

Al ser la irradiància una forma d'expressar potència entre superfície ( $W/m^2$ ), al integrar-la en el temps podem obtenir la radiació, irradiació o insolació, expressat en energia entre superfície ( $J/m^2$ ).

### Avaluació del recurs solar

L'avaluació solar pot realitzar-se o bé mitjançant una campanya de mesura (amb un mediador de radiació solar) o bé mitjançant dades sintètiques creades a partir de la informació recollida pels satèl·lits i centrals de meteorologia.

Els models matemàtics d'avaluació d'aquest recurs utilitzen informació de bases de dades solars per recrear models horaris realistes de la radiació solar a la zona d'estudi. Realitzen simulacions de patrons climàtics que canvien hora a hora basant-se en les dades conegudes. Son molt senzills d'utilitzar i eviten un procés llarg i car de mesura.

### Tecnologia fotovoltaica

L'energia solar fotovoltaica permet convertir la radiació solar en electricitat mitjançant captadors fotovoltaics. Els panells de cel·les fotovoltaïques estan formats per cel·les de



semiconductor (típicament de silici), tancades de forma estanca en panells per fer-les resistents a les adversitats. Aquests, generen tensió continua que mitjançant un inversor podrà ser transformada en corrent alterna per al seu consum, o podrà ser emmagatzemada en bateries sense necessitat de transformar-la.

El seu principi de funcionament consisteix en l'efecte fotovoltaic. Aquestes cel·les, no deixen de ser fotodíodes (amb una regió n i una p) en mode de treball on la intensitat entre ànode i càtode és negativa, i la diferència de potencial positiva, obtenint així una potència (consumida) negativa. Quan un fotó xoca contra la cel·la, arrenca un electró de la regió n creant un forat, obligant així a avançar als electrons generant una diferència de potencials entre borns del fotodíode.

$$\begin{cases} I_{AK} < 0 \\ V_{AK} > 0 \end{cases} ; P_{AK} < 0$$

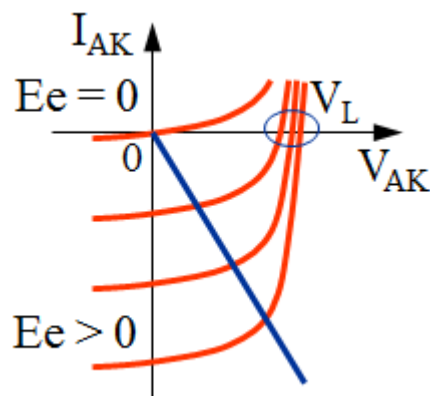


Fig. 3.11 Potencial vs. Intensitat del díode [6]

L'energia potencial fotovoltaica  $V_L$ , és la tensió que subministra la cel·la fotovoltaica en buit.

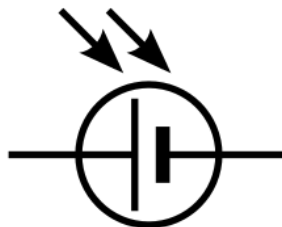


Fig. 3.12 Símbol del generador fotovoltaic

Les més emprades són les anomenades monocristal·lines i policristal·lines. Com el seu nom indica, la seva diferència principal és que la monocristal·lina aconsegueix refredar el silici de tal forma que s'obté un únic gran cristall que posteriorment es talla en fines capes que donen

lloc a les cel·les, mentre que el policristal·lí solidifica en cristalls diferents. Això fa que el monocristal·lí ofereixi una producció d'aproximadament  $150\text{Wp/m}^2$  i el policristal·lí de  $100\text{Wp/m}^2$ .

Els panells solars s'instal·len orientats cap al sud a l'hemisferi nord i al nord a l'hemisferi sud, i s'inclinen amb el mateix angle que la latitud per a contrarestar l'angle d'incidència del sol i obtenir una major irradiació. Com s'ha vist anteriorment, l'angle d'incidència solar va canviant durant el dia. Per aquesta raó, existeixen tecnologies de màxim aprofitament solar que compten amb un o dos eixos motoritzats que corregeixen l'angle d'incidència buscant la màxima radiació. Aquesta tecnologia aconsegueix augmentar entre un 25 i un 35% el rendiment tot i la seva instal·lació és molt més aparatosa i el seu preu molt més elevat per la qual cosa només surten a compte en zones d'alta latitud on existeixen canvis dràstics entre la posició relativa del sol entre hivern i estiu.

### 3.3.2. Recurs eòlic

#### Avaluació de recursos eòlics

L'escalfament desigual de l'atmosfera causada per la rotació de la terra, crea el moviment general de les masses d'aire anomenats vents alisis. Aquests fan circular l'aire des de les altes pressions de les zones subtropicals cap a les pressions més baixes (a l'equador). A escala local, els vents depenen de la climatologia, el paisatge i la superfície.

Per a poder realitzar l'avaluació del recurs eòlics de la zona, cal estudiar els històrics de vent. Les sèries temporals de vent permeten conèixer la variació estacional del vent per així poder dimensionar el sistema, que dependrà de la producció. Poden ser obtingudes de forma directa, amb mesures sobre el terreny, o de forma indirecta mitjançant softwares que utilitzen dades dels satèl·lits interpolades segons la topografia i elevació de la zona.

Les campanyes de mesures solen durar entre 1 i 2 anys i solen tenir un cost elevat en comparació al total del projecte. Al ser un procés llarg i precisar de material especialitzat, en aquest tipus de projectes s'acostumen a emprar dades de bases públiques o softwares especialitzats.

Les bases de dades públiques poden ser consultades des de l'Agència Internacional

d'Energies Renovables (IRENA), des del Banc Mundial (World Bank) o des de les dades meteorològiques de la Generalitat. El grau de precisió d'aquestes pot servir per fer un estudi preliminar però no per al projecte d'implementació. Altres fonts de dades com el software AWS TruePower OpenWind ofereixen dades suficientment fiables per poder utilitzar-les durant tot el projecte.

Mentre els bancs de dades públics realitzen les estimacions en quadrícules de 80 x 100 km i valors mensuals mitjans (12 dades anuals), OpenWind ofereix mesures sintètiques cada 3 hores a una quadrícula de 200 x 200 metres. Empra mesures reals realitzades horàriament a estacions meteorològiques properes i mitjançant una extrapolació (Simulació Atmosfèrica de Mesoescala o MASS), considerant la topografia i elevació, calcula el recurs. La malla obtinguda amb la informació dels vents, es pot superposar sobre un mapa de la zona per poder així estudiar els punts candidats a ser òptims per a la producció d'energia.

### **Anàlisi estadístic**

Habitualment a les zones d'estudi durant l'any abunden la brisa i els vents suaus, i els vents forts són poc comuns. Per saber amb precisió la variació del vent durant l'any, cal analitzar-lo de forma estadística per saber com serà el perfil, determinant la distribució de probabilitat de la velocitat.

La variació del vent s'acostuma a estudiar amb la distribució Weibull (Fig 3.13). Aquesta, és una distribució asimètrica en forma però simètrica en àrea, que presenta un desplaçament entre la velocitat predominant, la velocitat mitjana i la velocitat mediana. Si el factor de forma (k) és exactament 2, la distribució rep el nom de distribució de Rayleigh, el qual és usat pels fabricants d'aerogenerador per a proporcionar les gràfiques de rendiment.

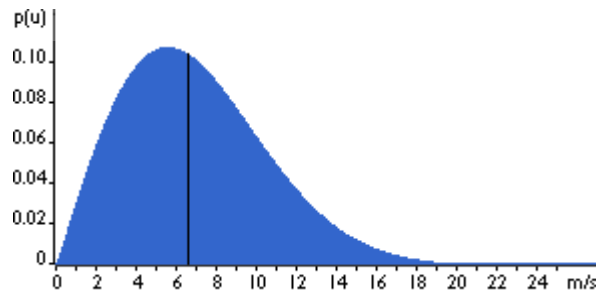


Fig. 3.13 Distribució Weibull ( $k=2$ ) o Rayleigh

La distribució de Weibull anterior presenta una velocitat predominant de 5,5 m/s, una velocitat mitjana de 7 m/s, una velocitat mediana de 6,6 m/s i un factor de forma  $k=2$ .

### Tecnologia eòlica

L'energia eòlica pot transformar-se en electricitat mitjançant aerogeneradors. Aquests estan formats per un generador elèctric que transforma l'energia cinètica del vent en forma de rotació de les pales en energia elèctrica. La quantitat d'energia que l'aerogenerador pot transformar depèn de la densitat de l'aire, de l'àrea d'escombratge (dimensions de les pales) i de la velocitat del vent.

La producció energètica d'un aerogenerador ideal està limitada a  $16/27$  (59%) de l'energia cinètica del vent segons la Llei de Betz. Si s'intentés extreure la màxima energia possible de l'aire, la velocitat de sortida de l'aerogenerador seria nul·la, i per tant la d'entrada també. La Llei de Betz calcula la potència màxima que es podrà extreure del recurs eòlic en funció a la velocitat d'entrada i sortida del vent a l'aerogenerador (Eq 3.9) [5].

La figura 3.14 representa el volum de control del cabal d'aire que passa per l'aerogenerador (àrea blava). Aquest és més ample per la sortida per complir amb la Llei de la conservació de massa, i per tant el cabal ( $Q_{\text{inicial}} = Q_{\text{final}}$ ).

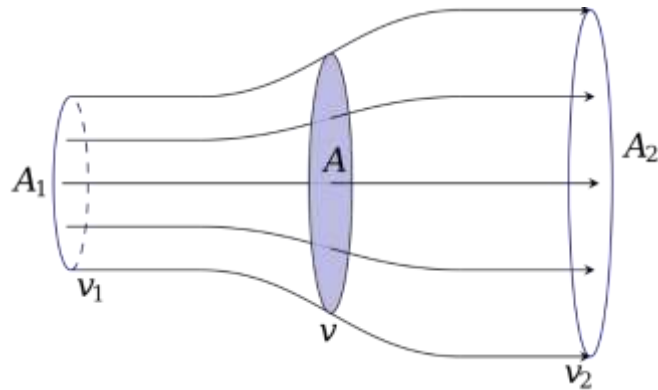


Fig. 3.14 Volum de control de l'aerogenerador

Cabal màssic

$$\dot{m} = \rho A(v_1 + v_2)/2$$

(Eq. 3.6)

Potència del vent extreta

$$P = \dot{m}(v_1^2 - v_2^2)/2$$

(Eq. 3.7)

Potència del vent

$$P_0 = \rho/2 v_1^3 A$$

(Eq. 3.8)

**Llei de Betz**

Rati de la potència en funció del vent

$$P/P_0 = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)$$

(Eq. 3.9)

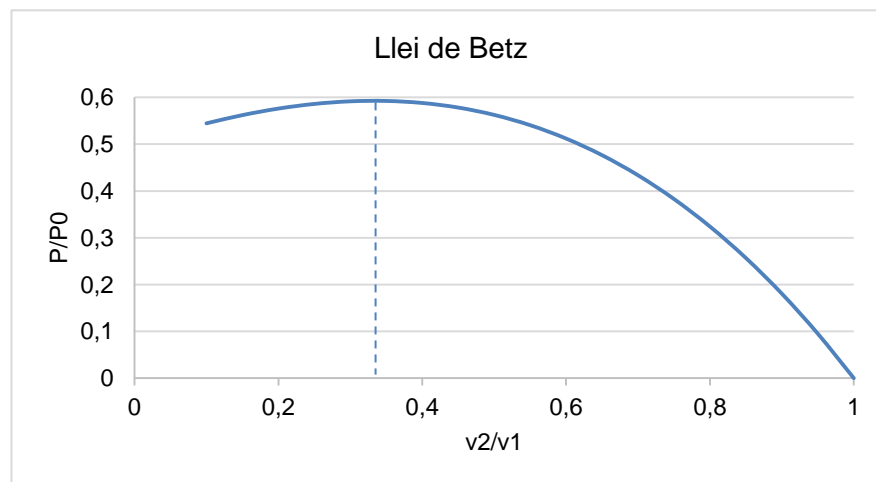


Fig. 3.15 Llei de Betz: Potència en funció de la velocitat

La figura 3.15 mostra com la corba de la potència extreta en funció de la velocitat presenta un màxim quan la velocitat de sortida és 1/3 la velocitat d'entrada.

Els aerogeneradors varien en mides i usos, essent els més efectius des del punt de vista de la inversió els de gran magnitud, que ofereixen rendiments molt superiors als de dimensions

inferiors. En els de gran mida, l'eix de les aspes transfereix l'energia a la caixa de canvis, la qual engrana per a poder arribar a una velocitat de generació òptima depenent de la velocitat a la que bufi el vent. La caixa de canvis simplement connecta l'eix de sortida a un generador elèctric (alternador trifàsic) que subministra corrent alterna a una freqüència diferent a la de consum. Posteriorment la corrent passa per un alternador per a obtenir una corrent que pugui ser connectada a la xarxa elèctrica.

Com pot observar-se a la taula inferior (Fig. 3.16), el rati entre l'àrea d'escombratge necessària per kW produït va disminuint en augmentar el diàmetre de l'aerogenerador.

Diàmetre	27 m	40 m	48 m	54 m	64 m	72 m	80 m
Àrea d'escombratge	573 m <sup>2</sup>	1257 m <sup>2</sup>	1810 m <sup>2</sup>	2290 m <sup>2</sup>	3217 m <sup>2</sup>	4072 m <sup>2</sup>	5027 m <sup>2</sup>
Potència produïda	225 kW	500 kW	750 kW	1000 kW	1500 kW	2000 kW	2500 kW
Rati m <sup>2</sup> /kW	2,55	2,51	2,41	2,29	2,14	2,04	2,01

*Fig. 3.16 Potència produïda per l'aerogenerador vs. Diàmetre del rotor*

Els aerogeneradors més petits, utilitzats en sistemes urbans, poden produir fins a 100kW i tenen un mecanisme més senzill. L'eix al que les aspes donen energia cinètica connecten directament amb el generador, que acostuma a ser de corrent contínua. Igual que en el cas de l'energia solar fotovoltaica, la corrent continua passa per un inversor per tal d'obtenir energia alterna a la freqüència desitjada, o s'envia directament a les bateries.

Dins de l'energia eòlica, podem diferenciar la marina o "off shore". Aquesta, ofereix la possibilitat d'instal·lar aerogeneradors més grans a zones on el vent és més poderós, obtenint així rendiments molt més grans arribant a obtenir fins a un 80% del límit de Betz. El problema associat que a dia d'avui encara està per solucionar és el gran cost associat a les connexions marines, la infraestructura que aquests generadors tenen associada i els grans costos de manteniment.

### 3.4. Recursos energètics no renovables

Els recursos energètics no renovables utilitzats més habitualment en micro-xarxes són el dièsel i el gas natural, ambdós combustibles fòssils. Aquests, tenen el seu origen en la

descomposició anaeròbica parcial de matèria orgànica que durant milions d'anys ha quedat sota capes de sediment a altes pressions i temperatures. Tenen un alt poder calorífic, per la qual cosa tenen un gran valor per a la producció energètica.

Els combustibles fòssils, causen un gran impacte mediambiental, degut a la contaminació emesa durant el seu procés de combustió i processament.

### **3.4.1. Gas Natural**

El gas natural és un hidrocarbur compost principalment per metà barrejat amb altres gasos lleugers d'origen natural. És un combustible fòssil, i s'extreu de jaciments independents a gran profunditat, o de jaciments petrolífers o de carbó. És refinat per a la seva comercialització en forma de gas natural (GN), gas natural liquat (GNL) o gas natural comprimit (GNC).

Al ser aquest gas una barreja de molècules, la seva refinació és imprescindible. El tractament consisteix en la separació dels diferents hidrocarburs barrejats amb el metà per a la seva comercialització individual (età, propà, butà, etc.) i de l'heli, que fa disminuir el poder calorífic. També pateix un procés de deshidratació per evitar la corrosió i la formació d'hidrats.

En la generació elèctrica, és emprat a les centrals de cicle combinat i de cogeneració, ambdues amb rendiments energètics molt elevats.

En comparació a la resta de combustibles fòssils, el gas natural té unes emissions més reduïdes i crema d'una forma més neta, eficient i segura. Tot i això, per la seva extracció habitualment s'utilitza el mètode de la fractura hidràulica o "fracking", que genera un gran impacte ambiental per el risc a la contaminació d'aqüífers.

## 4. Procés de disseny de projectes d'electrificació

A continuació es detalla el procediment que cal seguir per al disseny de projectes d'electrificació rurals. Es tracta la recollida de dades, la selecció de tecnologies, l'elecció de paràmetres, l'optimització del sistema i la lectura dels resultats.

A l'apartat 5.2 s'explica el software HOMER, utilitzat per a la construcció i optimització del model.

### 4.1. Procediment

La metodologia emprada per al disseny de les xarxes comprèn tres etapes: el treball preliminar i de camp, l'aplicació de paquets informàtics per al processament de les dades i l'avaluació de resultats i sensibilitat.

Tal com pot observar-se a la figura 4.1, al treball preliminar i de camp es realitzaran les tasques de recollida de dades. Aquestes, comprenen la informació de la *Localització*, l'*Avaluació dels recursos energètics*, la *Demanda horària* i la referent a les *Tecnologies disponibles* (de generació, emmagatzematge i transformació). La localització serà imprescindible per determinar les *Tecnologies disponibles*, l'*Avaluació dels recursos energètics*, i la *Demanda horària*. Ambdós seran importants per determinar el nivell de consum del qual la comunitat rural disposarà.

Seguidament s'aplicaran els paquets informàtics necessaris per al processament de les dades. Aquests empren per construir el model d'optimització, amb el que es procedirà a l'*Optimització de les corbes de costos de generació*, les quals acabaran determinant la *Configuració Òptima* per a cada cas.

A l'última etapa s'analitzaran els resultats obtinguts, i es realitzaran estudis de sensibilitat per a determinar la robustesa del sistema.



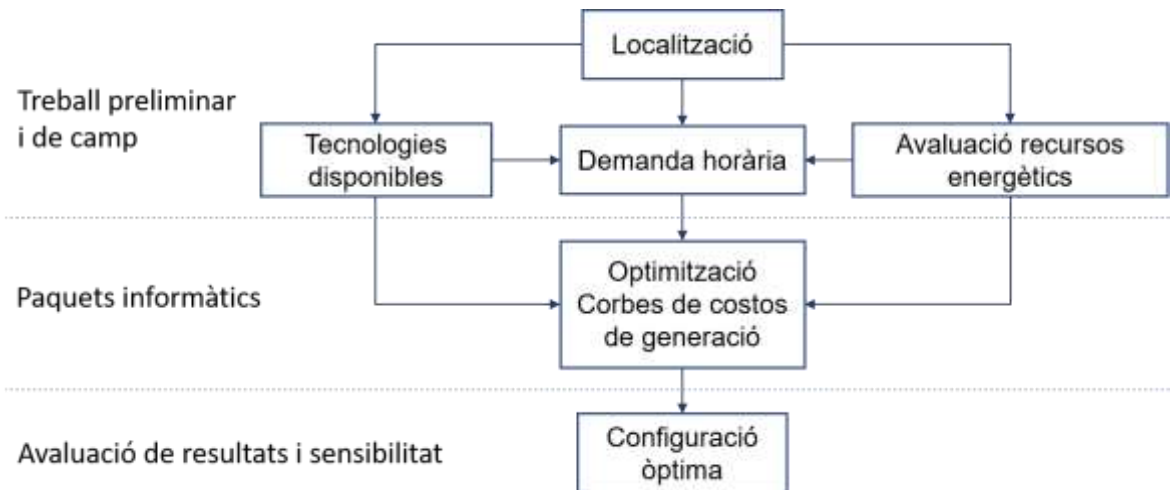


Fig. 4.1 Diagrama de blocs del procediment

#### 4.1.1. Treball preliminar i de camp

Aquesta fase del projecte contempla l'avaluació dels recursos energètics, la demanda elèctrica i de la zona d'estudi.

L'avaluació de recursos pot ser obtinguda de forma directa, mitjançant una campanya de mesures, o de forma indirecta amb softwares especialitzats i bases de dades públiques. La mesura directa, és exacte però és lenta i costosa, arribant a durar en el cas del recurs eòlic entre 1 i 2 anys per assegurar la fiabilitat de les dades.

Els mètodes indirectes ofereixen diferents graus de fiabilitat. Les bases de dades públiques, que podran ser consultades a través de les pàgines web del *The World Bank* o de l'Agència Internacional de les Energies Renovables (*IRENA*), ofereixen una precisió acceptable per un estudi preliminar. Per a la realització de l'estudi serà necessari obtenir les dades de softwares especialitzats que oferiran dades molt més precises.

Per avaluar la demanda elèctrica cal realitzar enquestes als habitants del municipi per definir amb precisió la demanda de cada habitatge o punt de consum de la comunitat. A partir d'aquest cens de càrrega es podrà conèixer el consum mitjà anual, mensual (considerant les variacions estacionals) i diari (perfil de càrrega diària) a cada punt de consum. Alternativament, també es pot calcular la demanda de forma sintètica. Utilitzant les dades de demanda oficials, extrapolant-les al tipus d'habitatge mitjà de la zona d'estudi, pot crear-se un perfil de demanda adient per a realitzar l'estudi.

La selecció de les tecnologies depèn directament de les fonts d'energia disponibles, del tipus de consum elèctric i del terreny disponible per a la seva instal·lació. A més, a l'optimització també es tenen en compte les característiques pròpies de funcionament, el preu dels aparells i el seu cost de manteniment. En el cas dels generadors, l'objectiu és estudiar els que tinguin un baix manteniment, que emprin recursos locals, que la seva generació sigui previsible i que tinguin una llarga vida útil. La localització determinarà les fonts energètiques disponibles, les quals conclouran el tipus de generació òptima.

És imprescindible realitzar un estudi sobre el terreny per identificar els espais on podran ser instal·lats els components de la microxarxa. En el cas dels aerogeneradors, s'haurà de trobar punts de bon potencial eòlic amb poca variabilitat. De la mateixa forma, en els terrenys proposats per a la instal·lació de plaques solars s'haurà de realitzar un estudi de les ombres incidents durant del dia per assegurar la màxima irradiació possible. Pel que fa les bateries, els inversors i el generador auxiliar, caldrà buscar emplaçaments adequats que compleixin la normativa vigent.

#### **4.1.2. Paquets informàtics**

Per a optimitzar un model amb tants paràmetres, és necessari utilitzar un software d'optimització específic. Un model d'optimització molt emprat per aquests tipus de projectes és HOMER. Aquest, explicat en detall a l'apartat 5.2., permet definir la xarxa introduint-hi totes les constants característiques del sistema i simula el funcionament del sistema les 8760 hores de l'any per calcular la millor configuració.

Un cop optimitzat el model, els resultats poden ser classificats de dues formes: general i categoritzada [15]. A les dues s'ordenen els resultats en funció del cost net actual i es diferencien en la quantitat de dades que mostren. La general mostra totes les combinacions possibles mentre que la categoritzada mostra només les millors opcions de cada configuració d'elements diferent.

#### **4.1.3. Avaluació de resultats i sensibilitat**

L'anàlisi de sensibilitat permet determinar l'estabilitat de la base òptima, de la solució òptima front a canvis en un paràmetre del model. En aquest tipus de simulacions, s'utilitza per a estudiar l'efecte de canvis en la demanda o en els recursos energètics en el funcionament de la microxarxa. És sobretot útil quan no es té la seguretat del valor exacte que ha de prendre una variable.

En el cas de la demanda, que és un factor que varia amb facilitat, es realitza l'estudi amb variacions tant superiors com inferiors d'un 10% o 20% per determinar si el sistema és capaç de suportar l'excés de càrrega (en el cas superior), o si el decrement de la càrrega fa canviar la configuració per l'excés de producció.

Amb el software HOMER, l'anàlisi de la demanda pot realitzar-se simplement especificant els valors que pot prendre la variable a estudiar.

## 4.2. HOMER

HOMER és un potent programa de disseny de micro-xarxes elèctriques que simplifica la tasca de dimensionar de forma òptima els sistemes. En el procés de disseny de micro-xarxes, cal tenir en compte un gran nombre de paràmetres que farien impossible el càlcul manual. Aquest software permet optimitzar els elements i capacitat del nostre disseny per tal d'obtenir la xarxa més eficient, en funció dels recursos energètics, la disponibilitat dels mateixos, la demanda elèctrica i el tipus de xarxa que es vol dissenyar.

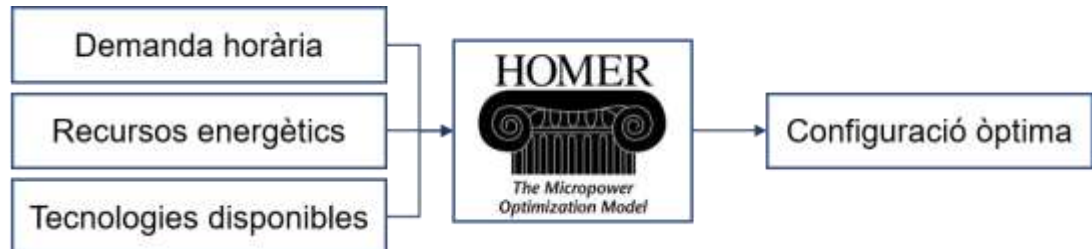


Fig. 4.2 Diagrama de blocs de HOMER

HOMER realitza l'anàlisi del sistema mitjançant balanços d'energia per les 8.760 hores de l'any, tot comparant la demanda elèctrica i tèrmica de cada hora, amb l'energia que el sistema pot aportar a la xarxa. A l'hora, calcula els fluxos d'energia que entren i surten del banc de bateries per tal d'optimitzar-ne el nombre i regular el seu ús.

Al finalitzar les simulacions, mostra el llistat de diferents configuracions òptimes en ordre ascendent segons el cost net de la instal·lació. Ofereix també un complet recull de dades, tant numèriques com gràfiques per facilitar l'avaluació i la posterior elecció de la microxarxa més adient. Les dades ofertes mostren tant l'anàlisi elèctric com l'econòmic, estudiant la inversió a l'horitzó indicat.

El programa ofereix una interfície fàcil d'entendre. El primer pas per a crear el model és construir l'esquemàtic seleccionant les tecnologies que voldrem estudiar. Aquestes no quedaran connectades al sistema fins a que no inserim totes les dades necessàries per a la simulació d'aquestes. Serà necessari introduir les dades relacionades amb la potència (corbes de producció per exemple), el cost, el cost de reemplaçament i el cost de manteniment. El mateix programa compta amb una extensa biblioteca de components que simplifica el procés. Com la magnitud de cada component seran les variables del sistema, serà necessari establir un rang per a cadascun.

Seguidament cal introduir les dades de la càrrega. És necessari introduir com a mínim el perfil horari diari mitjà anual, amb el qual el programa generarà les variacions estacionals depenent de la ubicació. En el cas de saber les dades reals, també pot introduir-se un arxiu de text amb les 8760 dades horàries anuals per obtenir una resultat més exacte.

A l'introduir a l'esquemàtic els generadors de la instal·lació, apareixeran els recursos energètics associats a cadascun. El recurs solar l'obtindrà HOMER de forma automàtica amb les dades de IRENA i la NASA. Per la resta de dades renovables caldrà introduir les dades horàries anuals per a definir de forma precisa els recursos. Finalment als combustibles caldrà introduir-hi el cost i si es precisa el consum anual màxim.

Com a últim pas, s'introdueixen els inputs econòmics (tassa d'interès anual i duració del projecte) i altres els paràmetres de l'optimització com limitacions del sistema o limitacions en les emissions.

Un cop introduïdes totes les dades, el programa calcularà la combinació òptima, la qual s'haurà d'anar refiant fent canvis en el rang de les variables per aconseguir les especificacions desitjades.

Els resultats de HOMER incorporen una gran quantitat de dades per a poder estudiar el comportament del sistema resultant.

S'ha escollit HOMER per a realitzar aquest treball, seguint els passos d'altres treballs realitzats en condicions rurals similars a les d'aquest treball.

El primer treball, titulat *Analysis of off-grid electricity system at Isle of Eigg* [18], tracta l'anàlisi de l'electrificació de la illa de Eigg. Aquesta illa escocesa sense accés a l'electricitat de la xarxa, funciona des de l'any 2008 de forma autosuficient. Les seves característiques

topogràfiques van determinar que el cost de transportar l'electricitat fins la illa era superior al de la implementació d'una microxarxa.

La xarxa instal·lada a Eigg s'alimenta amb plaques solars fotovoltaïques, aerogeneradors, centrals hidroelèctriques i generadors de dièsel (de suport). L'estudi analitza mitjançant HOMER la configuració de la mateixa i proposa alternatives per a optimitzar-la. També realitza un estudi de sensibilitat per a determinar la resistència a canvis a la xarxa.

El segon treball, *Formative evaluation of sustainability in rural electrification programs from a management perspective: A case study from Venezuela* [2], avalua la metodologia dels programes d'electrificació rural basats en energies renovables, basant-se en quatre dimensions proposades: ambiental, tècnica, socioeconòmica i institucional. S'analitza també el programa veneçolà "Sowing Light", que detalla les tres fases d'implantació, el model de gestió i els mecanismes d'implementació de xarxes elèctriques fotovoltaïques a rurals.

Finalment a l'últim estudi, *Sustainability and design assessment of rural hybrid microgrids in Venezuela* [1], també dins del programa "Sowing Light", avalua el disseny i la sostenibilitat de les micro-xarxes híbrides a Veneçuela. Utilitza HOMER per a l'optimització de xarxes a diferents poblacions del nord-oest del país.

## 5. Cas d'estudi

L'estudi ha estat realitzat al municipi gironí de Beuda, el qual es troba en ple entorn rural. En aquest capítol es presentarà la informació sobre el municipi, i es detallarà el càlcul de la configuració de la microxarxa, la proposta integral d'electrificació, l'anàlisi de sensibilitat i finalment l'estudi econòmic.

Els objectius de desenvolupament sostenible de les Nacions Unides (ODS), consideren fonamental l'accés a l'energia per i la reducció de la pobresa energètica. L'objectiu número 7, reclama "l'accés a l'energia assequible, fiable, sostenible i moderna per a tothom", i en el context europeu, s'ha desenvolupat projectes que ho reivindiquen com el denominat *Energy Rights For All Europeans*. A Espanya, els indicadors de pobresa energètica mostren que el 29% de la població (13,2 milions de persones) tenen dificultats per assumir l'import del consum energètic domèstic. Les regions amb més afectacions, són alhora les que tenen més radiació solar. Per tant s'evidencia l'existència d'una oportunitat desaproveitada de l'ús de l'energia solar com a eina de superació de la pobresa energètica [3].

### 5.1. Beuda

Beuda és un municipi del Prepirineu situat a la comarca de La Garrotxa, Girona. Es troba a una altitud de 338 msnm a un vessant del massís del Mont, i té una superfície de 35,9 Km<sup>2</sup>. Està format per quatre petits nuclis: Beuda, Segueró, Lligordà i Palera.



Fig. 5.1 Beuda, Segueró, Lligordà i Palera

És un poble d'origen romànic que encara edificis de gran valor patrimonial com castells, cases pairals i esglésies a un paratge natural ben conservat. Entre el seu patrimoni

destaquen les esglésies, totes romàniques, de Sant Pere de Lligordà (s.XII), Santa Maria de Palera (s.XII), Sant Feliu de Beuda (s. XI) i Santa Maria de Segueró (s.XI), i el Sant Sepulcre de Palera (construcció romànica que data de l'any 1085).



Fig. 5.2 Mapa de Beuda

La seva població està formada per un total de 187 habitants. La piràmide demogràfica (Fig. 5.3) lleugerament regressiva, situa el seu gruix poblacional a la franja entre els 30 i 50 anys, i presenta una taxa de natalitat baixa.

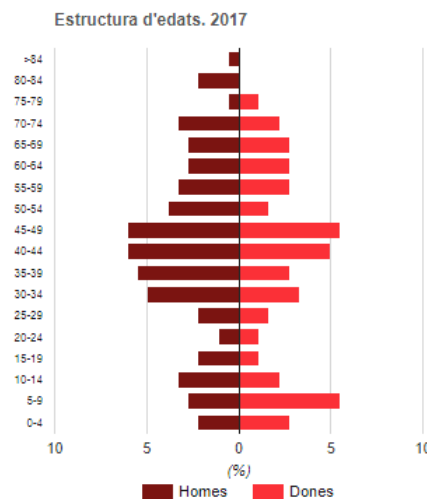


Fig. 5.3 Piràmide demogràfica de Beuda



L'activitat econòmica del poble està centrada en els serveis , l'agricultura de secà (vinya, oliveres i cereals), la ramaderia bovina, ovina i porcina, les pedreres d'alabastre i granit i una petita part en la indústria. El sector serveis desenvolupa la seva activitat entorn al turisme rural de cap de setmana, sent el principal atractiu l'escalada i el senderisme. El municipi compta amb deu allotjaments de turisme rural, tres de turístics i tres restaurants.

Pel que fa l'activitat restant, hi ha 9 explotacions agràries amb una superfície total de 1181Km<sup>2</sup> i 5 explotacions ramaderes amb unes 250 unitats.

Els 92 habitatges del poble són exclusivament masies i cases unifamiliars aïllades.

## 5.2. Identificació de les dades de demanda i els recursos energètics

### 5.2.1. Càlcul del perfil horari de demanda

La demanda elèctrica canvia constantment. Aquesta variabilitat és deguda a la conducta dels consumidors de la xarxa, que canvia entre hores, entre dies de la setmana i cap de setmana, entre estacions, etc.

En aquest cas, no s'ha pogut obtenir l'històric de dades reals de la demanda elèctrica, ni s'ha pogut realitzar una enquesta als habitants. Per això a estat necessari crear un perfil de demanda de càrrega sintètic adequat als habitants de Beuda, mitjançant l'ajust d'una funció sinusoidal. S'ha donat forma a la corba amb els valors de demanda residencial mitjana del que figuren a l'IDAE [7] i s'hi ha aplicat un marge de seguretat de 1,5 tenint en compte el tipus de residència (majoritàriament unifamiliar aïllada).

$$D_i = \bar{D} \left\{ 1 + \cos \left[ \left( \frac{2\pi}{24} \right) (i - \theta) \right] \right\} \text{ per } i = 1, 2, \dots, 24$$

(Eq. 5.1)

*i*: hora actual

*θ*: hora pic

En el cas de l'habitatge mitjà espanyol, el perfil de càrrega presenta dos pics de consum clarament diferenciats a les 11:00h i a les 20:00h respectivament. Per aconseguir els dos



pics, s'ha realitzat la suma de dues funcions de demanda sintètiques, centrades cadascuna a una hora de consum pic.

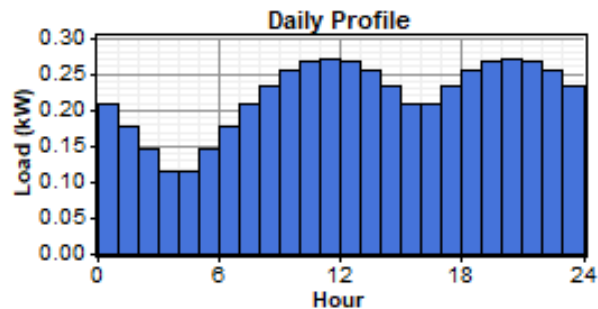


Fig. 5.4 Perfil elèctric diari domèstic

Finalment s'ha obtingut un perfil de potència anual mitjana de 5.19kWh/d, tal com es pot observar a la figura 5.4, i pic de consum de 483W.

Amb la informació proporcionada per l'ajuntament determinem el nombre total d'habitatges (92) i la població total (187) del municipi de Beuda, i la que resideix a cada nucli. Al no saber el nombre d'habitatges que pertanyen a cada nucli, realitzem una extrapolació considerant la densitat de població constant per a poder dissenyar el sistema com el conjunt de quatre càrrega independents. Finalment, extrapolem la corba de consum domèstic als quatre poblats amb el nombre d'habitatges calculat anteriorment (Fig. 5.5).

<b>Beuda</b> 83 habitants 41 habitatges Scaled anual average = 212.79kWh/d	<b>Lligordà</b> 34 habitants 17 habitatges Scaled anual average = 88.23kWh/d
<b>Palera</b> 14 habitants 7 habitatges Scaled anual average = 36.33kWh/d	<b>Segueró</b> 56 habitants 27 habitatges Scaled anual average = 140.13kWh/d

Fig. 5.5 Habitats, habitatges i càrrega per nucli



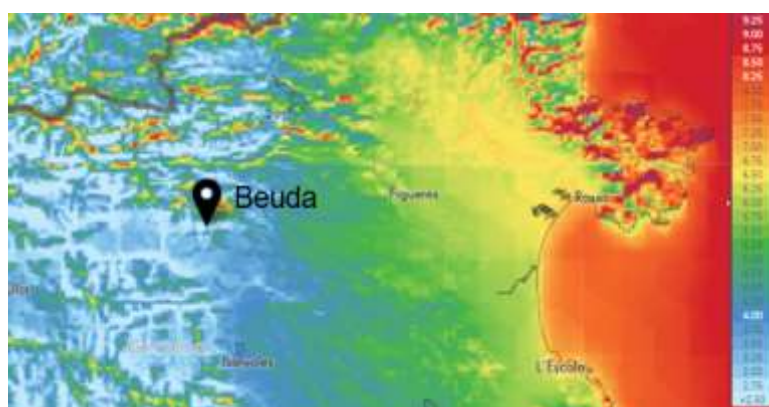
*Fig. 5.6 Vista aèria de Lligordà, Palera, Beuda i Segueró*

### 5.2.2. Anàlisi dels recursos

A les instal·lacions rurals, la generació renovables més utilitzada son les plaques solars fotovoltaïques, que representen fins a un 50% de les instal·lacions [13].

#### Recurs eòlic

Com es pot observar al mapa de velocitats de vent de la figura 5.7, Beuda es troba a una zona de baixes velocitats. Per aquesta raó és important realitzar aquest anàlisi amb dades de qualitat, per decidir si serà suficient per a la producció elèctrica.



*Fig. 5.7 Mapa eòlic*

Per obtenir les dades del recurs eòlic de cadascun dels nuclis, s'ha emprat el software

OpenWind. Aquestes dades caracteritzen l'energia a cada hora durant un any, en un total de 8.760 dades. Per a fer-ho, el programa dona la temperatura, la pressió, la direcció, la velocitat i la densitat de l'aire, tot i que en aquest cas el software HOMER només requerirà la velocitat.

Un cop processades les dades, observant les velocitats mitjanes mensuals de la figura 5.8 es comprova que al municipi de Beuda el recurs eòlic és molt pobre. Tot i tenir pics de velocitat, la majoria del temps la velocitat a 20 metres d'alçada (màstil del aerogenerador) es manté per sota dels 2 m/s, fet que fa desaconsellar la instal·lació d'aerogeneradors pel seu baix rendiment.

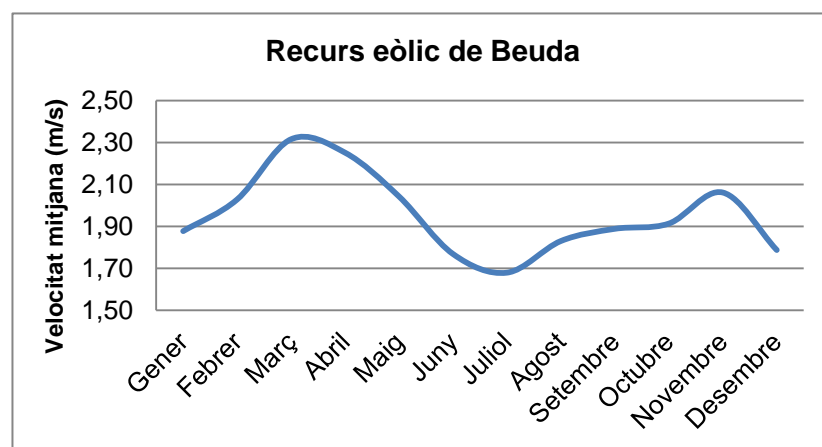


Fig. 5.8 Recurs eòlic a Beuda

Per a realitzar l'anàlisi de la distribucions del vent s'ha fet servir la distribució de Weibull, utilitzada en aquest camp per a modelar les variacions a la velocitat del vent. Aquesta distribució mostra la probabilitat que existeix perquè el vent bufi a una determinada velocitat.

El factor d'escala, indica la posició de la mitjana de la distribució. Es relaciona amb l'amplada de la distribució, de tal forma que quant més gran és el paràmetre d'escala, més ample és la distribució.

Al ser aquesta una distribució asimètrica, és necessari un factor de forma (k) per determinar la distribució de les dades.

	Weibull	K (factor de forma)	C (factor d'escala)
Beuda	1.85	1.85	1.92 m/s
Palera	2.35	2.35	2.40 m/s
Segueró	2.13	2.14	2.21 m/s
Lligordà	2.08	2.08	2.28 m/s

Fig. 5.9 Anàlisi mitjançant la distribució de Weibull

A la figura 5.9 mostra que en els quatre nuclis la velocitat mitjana (factor d'escala) és molt baixa. Interessa que el factor de forma sigui proper a 2 (Distribució de Rayleigh), ja que valors superiors signifiquen que la dispersió també és major, i el valor mig menys representatiu, sent així un recurs molt poc predictable.

### Beuda

Factor de forma ( $k$ ) = 1.85

Factor d'escala ( $c$ ) = 1.92 m/s

La distribució de Weibull (Fig. 5.10) mostra una forma bastant afilada, deguda al seu baix factor de forma i una distribució predominant en les velocitats baixes de vent per el baix factor d'escala.

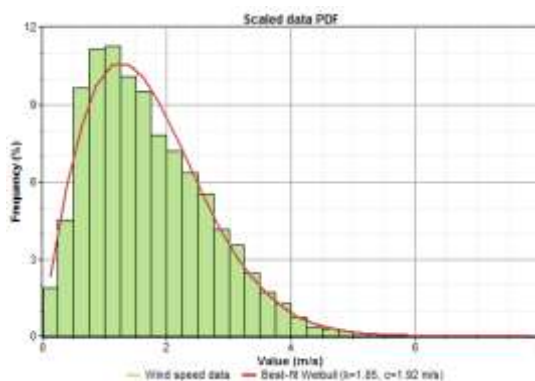


Fig. 5.10 Distribució Weibull del vent a Beuda

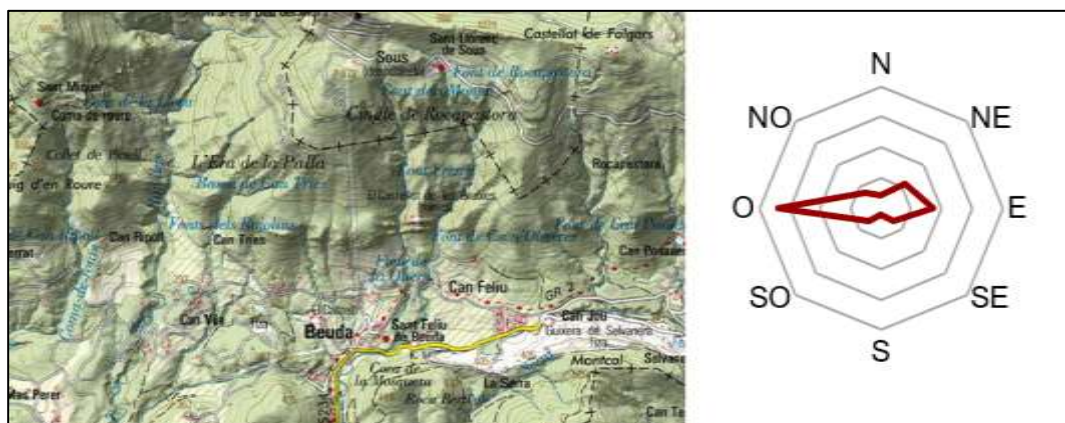


Fig. 5.11 Mapa topogràfic de Beuda i Rosa dels vents

El vent a Beuda és també limitat per la seva ubicació, a la vall entre monts. La rosa dels vents (Fig 5.11) mostra que el vent predominant és el de ponent (oest), coincidint amb la direcció de la vall.

### Palera

Factor de forma ( $k$ ) =2.35

Factor d'escala ( $c$ ) =2.40 m/s

La distribució (Fig. 5.12) en aquest cas és més dispersa al tenir el factor de forma superior a 2 (Distribució de Rayleigh). Tot i tenir un factor d'escala major, el recurs continua sent una molt pobre.

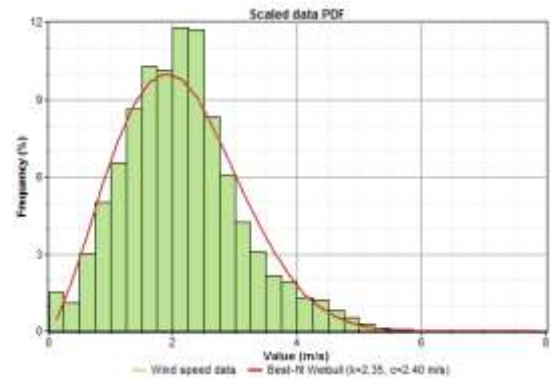


Fig. 5.12 Distribució Weibull del vent a Palera

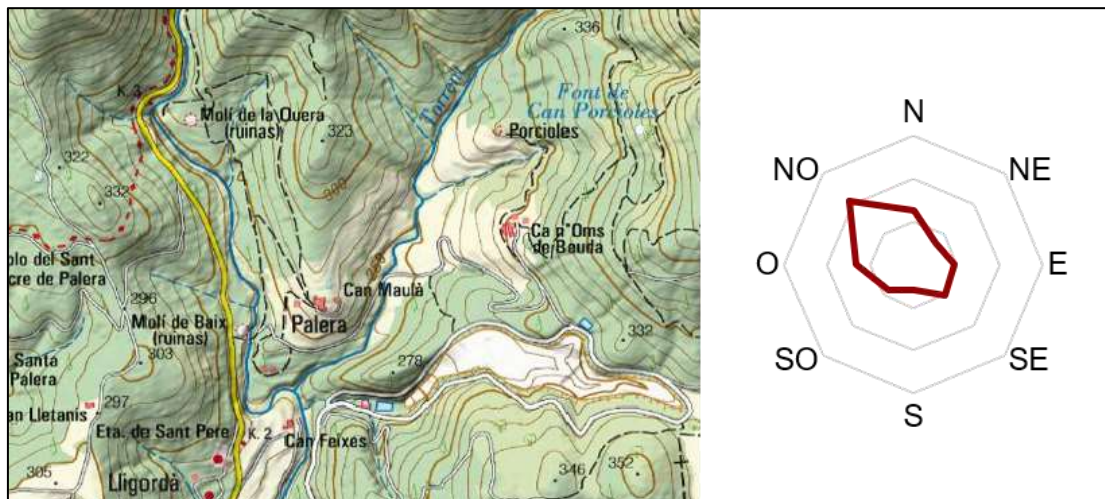


Fig. 5.13 Mapa topogràfic i Rosa dels vents de Palera

La rosa dels vents (Fig. 5.13) mostra una gran variabilitat de la direcció del vent amb una lleugera tendència cap al nord-oest (mestral). Les característiques geogràfiques com les de Palera acostumen a crear acceleracions disperses del vent.



### Segueró

Factor de forma ( $k$ ) = 2.13

Factor d'escala ( $c$ ) = 2.21 m/s

La distribució del vent a Segueró (Fig. 5.14) és més propera a la de Rayleigh, i com als casos anteriors, té un factor d'escala també baix.

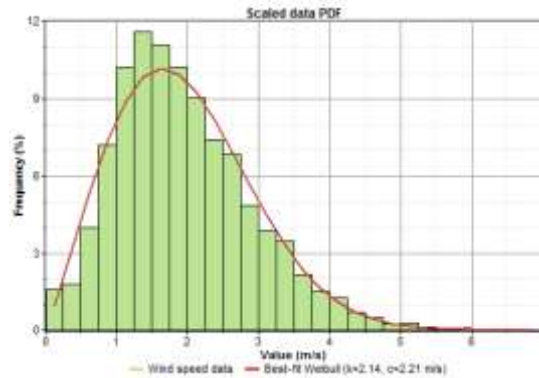


Fig. 5.14 Distribució Weibull del vent a Segueró



Fig. 5.15 Mapa topogràfic i Rosa dels vents a Segueró

Com es pot observar a la rosa dels vents (Fig. 5.15), la direcció del vent a Segueró és molt variable i mostra poca relació amb les formes topogràfiques o la disposició de la vegetació.

### Lligordà

Factor de forma ( $k$ ) = 2.08

Factor d'escala ( $c$ ) = 2.28 m/s

En el cas de Lligordà (Fig. 5.16) la distribució té un factor de forma molt proper a 2, la qual cosa es considera favorable. Tot i això, la constant d'escala continua sent baixa per a la producció elèctrica.

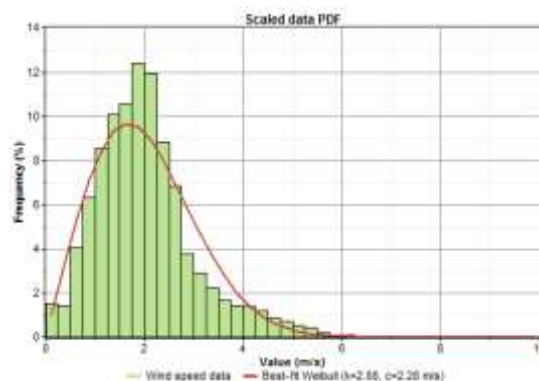


Fig. 5.16 Distribució Weibull del vent a Lligordà

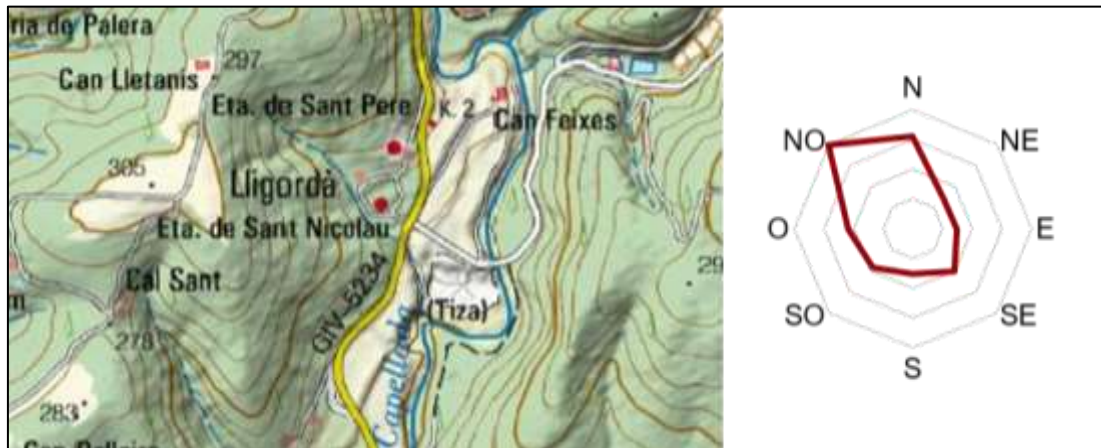


Fig. 5.17 Mapa topogràfic i Rosa dels vents a Lligordà

La rosa dels vents de Lligordà, mostra certa relació amb el mapa topogràfic (Fig. 5.17). El vent va en direcció nord-oest principalment (mestral) i nord (tramuntana), coincidint amb la forma de la vall.

Com es pot observar a les diferents gràfiques de la distribució de les velocitats del vent, Palera és la que presenta valors més elevats. En contraposició, Beuda presenta els més lents. A tots els casos el vent presenta velocitats mitjanes baixes i a la majoria també varietat de direccions.

Coneixent les característiques del vent, a l'hora d'introduir les dades de l'aerogenerador hem buscat un que fos per entorns rurals, de baixes velocitats. La marca Bornay té una gama de aerogeneradors de les característiques desitjades. Comparant la corba de l'aerogenerador (Fig. 5.18) amb els perfils de vent obtinguts determinem que cap dels quatre té una magnitud suficient per a moure l'aerogenerador. Tal i com podem observar a les seves corbes de generació, treballa de forma òptima entre els 5 i 15 m/s, i un arrencament a 3 m/s.

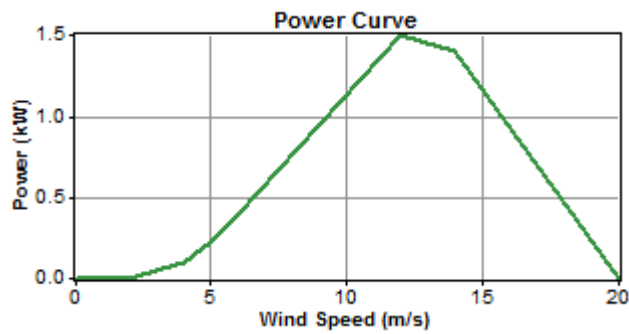


Fig. 5.18 Corba de generació de l'aerogenerador

## Recurs solar

Tal com ja s'ha comentat anteriorment, les dades del recurs solar són automàticament buscades per HOMER a la base de dades de la NASA a partir de les coordenades de Beuda introduïdes. Les dades obtingudes seran resultat de la simulació de la radiació solar incident en el poble, que tindrà en compte factors climatològics per a dur-ho a terme.

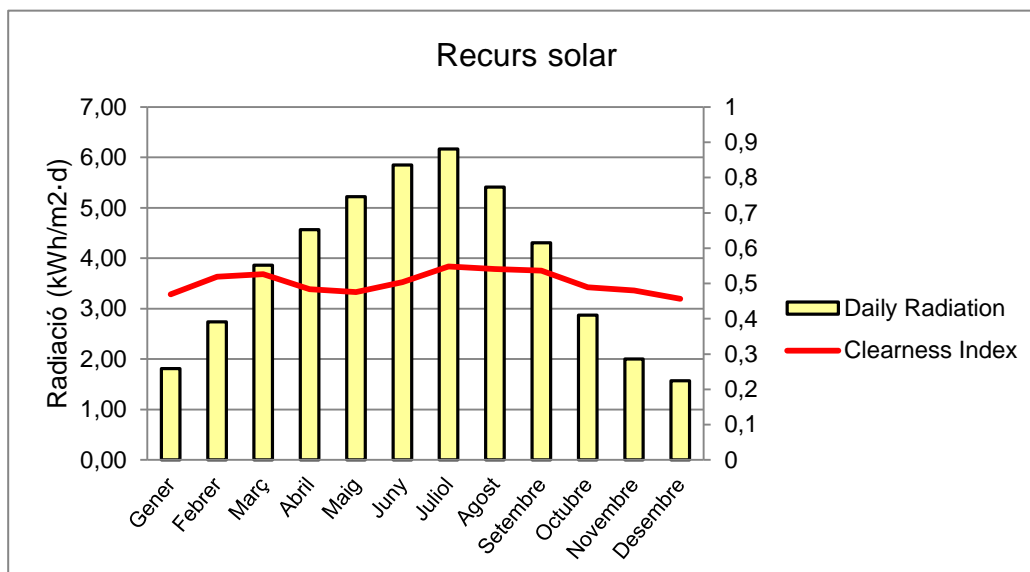


Fig. 5.19 Recurs solar de Beuda

Com es pot observar al gràfic (Fig. 5.19), s'obté tant la radiació diària com l'índex de claredat, que ens mostra quin percentatge de radiació que arriba a l'atmosfera acaba incidint sobre la superfície.

Comparant les mitjanes mensuals amb altres dades recollides per l'estació meteorològica de



Girona (Fig. 5.20) es pot observar la similitud amb les dades sintètiques generades per a Beuda.

	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	
Inclinació	6,79	9,52	13,5	17,8	21,1	22,6	21,9	19,1	15	10,7	7,4	5,95	MJ
0º	1,89	2,64	3,74	4,94	5,87	6,29	6,09	5,30	4,16	2,98	2,06	1,65	kWh

Fig. 5.20 Dades solars de l'estació meteorològica de Girona

La radiació solar té una component estacional que limita la producció fotovoltaica horàriament tenint el seu màxim de producció als dies propers al solstici d'estiu i la mínima producció al solstici d'hivern (Fig. 5.21), al trobar-nos a l'hemisferi nord.

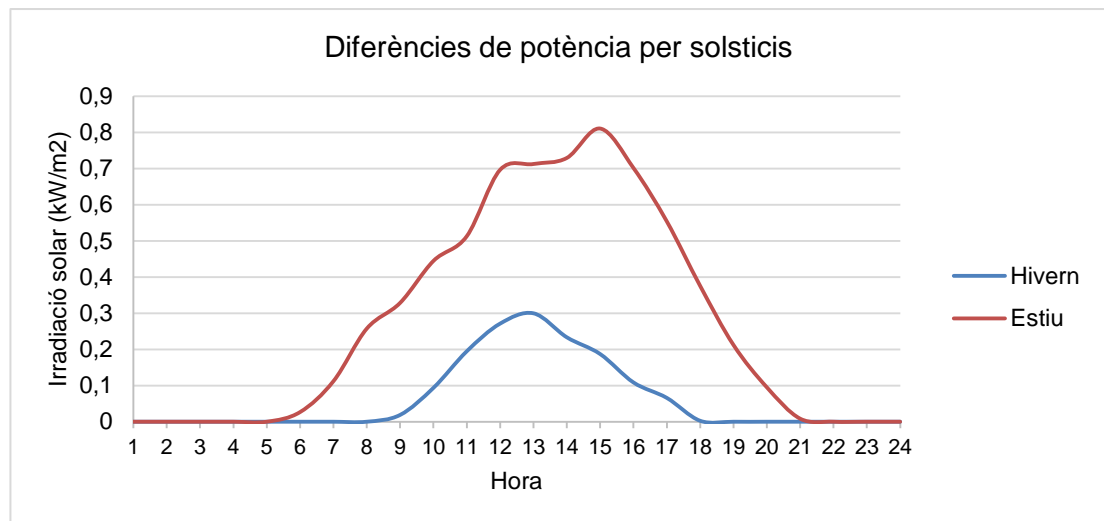


Fig. 5.21 Irradiació solar a solsticis

Per contraposició al recurs eòlic, el recurs solar té una gran potència i servirà per a generar l'electricitat demandada.

Ha de tenir-se en compte a l'hora de modelar el sistema, l'efecte de l'absorció i dispersió a la radiació a l'atmosfera pot fer canviar la incidència bruscament en tant sols un dia. A l'exemple inferior (Fig. 5.22) es pot observar la diferència entre l'energia captada entre dos dies seguits a Beuda.

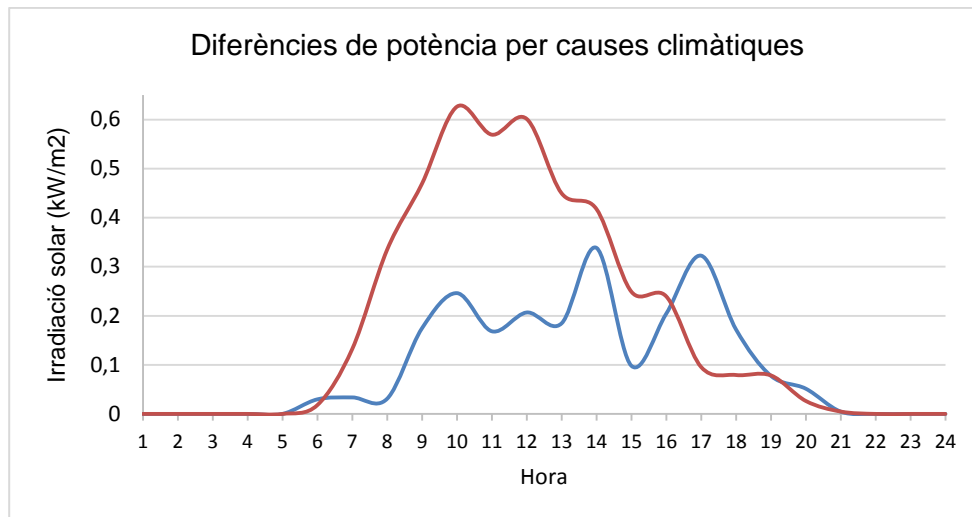


Fig. 5.22 Variacions de la irradiació solar per causes climàtiques

### Recurs combustible

A l'hora d'escollir el combustible del generador, s'ha optat per l'alternativa més eficient i amb menys emissió de gasos dels combustibles fòssils comercials; el gas natural. Comparant les emissions amb altres combustibles segons el factor d'energia elèctrica final a energia primària observem com el gas natural té menys impacte ambiental fins i tot que l'electricitat de la xarxa.

	kg CO <sub>2</sub> /kWh E. Elèctrica final
Electricitat convencional Nacional	0,399
Gas natural	0,252
Dièsel	0,311

Fig. 5.23 Emissions de combustibles fòssils [8]

Finalment obtenim el preu del gas natural, que serà introduït al model a optimitzar.

€/kWh	kWh/m3	€/m3
0.05	11.7	0.585

Fig. 5.24 Preu del gas natural

Degut a la manca de dades, no hem pogut determinar la viabilitat d'utilitzar biogàs com a combustible del generador. Si la producció agrícola ramadera fos suficientment gran, podria produir-se amb les deposicions d'aquests, emprant-se en substitució del gas natural.

### 5.3. Proposta integral d'electrificació

Un cop realitzades s'obtenen totes les dades, es realitza la simulació amb HOMER. En aquest procés, cal donar un rang als graus de llibertat (el nombre d'elements de cada tipus) que cal anar ajustant realitzant optimitzacions recursives fins arribar a resultats que s'adaptin a les necessitats del projecte. Finalment determinarem les configuracions òptimes per a les nostres micro-xarxes, tot comparant-ne el cost i les emissions de l'energia produïda amb les de la xarxa convencional.

Per a poder comparar el cost dels sistemes amb la xarxa, es calcula amb el mateix perfil de demanda com si es trobés connectat a la xarxa [9]. Com mostra la figura 5.25, el cost de l'electricitat de la xarxa té dos components: la facturació per potència contractada i la facturació per l'energia consumida.

Facturació per potència contractada	Terme fix de costos de comercialització	3,1702855 €/kW·mes
	Peatge d'accés	38,043426 €/kW·any
Facturació per energia consumida	Cost de l'energia	0,062012 €/kWh
	Peatge d'accés	0,044027 €/kWh

Fig. 5.25 Cost elèctric mitjà a Espanya

<b>Facturació per potència contractada</b>	
5 kW x 38,043426 €/kW·any x (30/365) dies	15,63 €
5 kW x 3,1702855 €/kW·any x (30/365) dies	1,30 €
<b>Facturació per energia consumida</b>	
157,86 kWh x 0,062012 €/kWh	9,78 €
157,86 kWh x 0,044027 €/kWh	6,95 €
<b>Subtotal</b>	<b>33,66 €</b>
Impost d'electricitat (5,11269632 %)	1,72 €
Lloguer d'equips (30 dies)	1,35 €
<b>Subtotal (altres conceptes)</b>	<b>36,72 €</b>
IVA (21%)	7,71 €
<b>TOTAL</b>	<b>44,44 €</b>
<b>COE (Costat de l'electricitat)</b>	<b>0,281 €/kWh</b>

Fig. 5.26 Factura elèctrica mensual a Beuda

### 5.3.1. Beuda









				PV (kW)	Label (kW)	H1500	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Natural gas (m3)	Label (hrs)	Batt. Lf. (yr)
				55	10	168	24	\$ 161,290	7,160	\$ 252,820	0.255	0.78	7,245	2,012	20.0

Fig. 5.27 Resultats de l'optimització a Beuda

La configuració final obtinguda per a Beuda (Fig. 5.27), compta amb 275 plaques fotovoltaïques de 200W, 168 bateries de 1.5kAh, un generador de gas natural de 10kW i un inversor de 24kW. Com ja es va intuir anteriorment, la possibilitat d'utilitzar un aerogenerador queda descartada.

El cost de l'energia és de 0,255€/kWh, amb una inversió inicial de 161.290€ i un VAN de 252.820€. El cost de l'energia resulta ser més barat que el de l'energia de la xarxa, tot i l'elevat nombre de bateries necessàries.

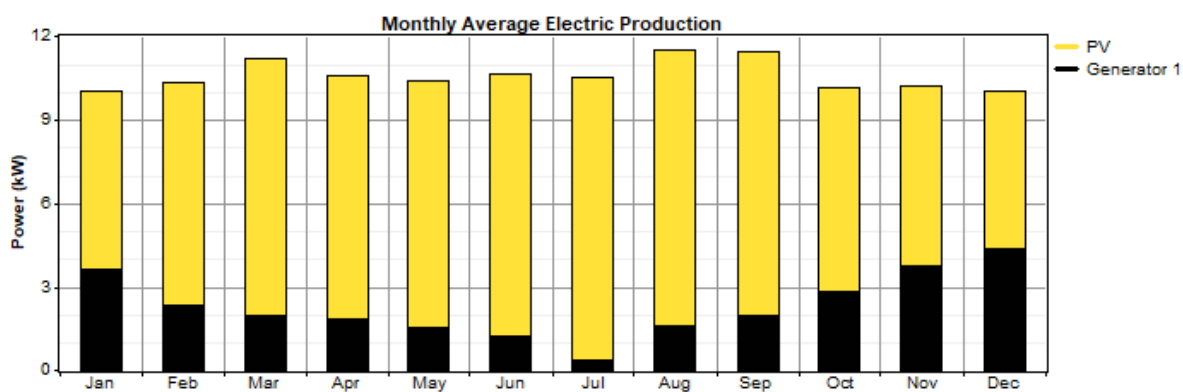


Fig. 5.28 Recursos utilitzats a Beuda

Com mostra el gràfic anterior (Fig. 5.28), la generació predominant al sistema és la fotovoltaica, emprant el generador de gas natural en moments de demanda molt elevada, obtenint així la fracció renovable del 78.3%, sense cap tall de subministrament i amb una vida útil de les bateries de 20 anys.

Production	kWh/yr	%
PV array	72,667	78
Generator 1	20,104	22
Total	92,770	100

Quantity	kWh/yr	%
Excess electricity	1,814	1.96
Unmet electric load	34.2	0.04
Capacity shortage	60.7	0.08
Quantity	Value	
Renewable fraction	0.783	
Pollutant	Emissions (kg/yr)	
Carbon dioxide	13,974	

Fig. 5.29 Generació a Beuda

A les dades de generació, pot observar-se una producció total de 92.770 kWh/any que genera 13.974 kg/any d'emissions de CO<sub>2</sub>, obtenint així un factor d'emissions de 0,15 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Tot i necessitar un generador de gas natural, l'energia produïda a Beuda és molt més neta que la de la xarxa convencional, amb unes emissions de 0,399 kg CO<sub>2</sub>/kWh (56% inferiors).

### 5.3.2. Lligordà









				PV (kW)	Label (kW)	H1500	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Natural gas (m3)	Label (hrs)	Batt. Lf. (yr)
				30	10	96	9	\$ 92,440	1,998	\$ 117,978	0.287	0.90	1,230	427	20.0

Fig. 5.30 Resultats de l'optimització a Lligordà

A Lligordà, la instal·lació comptarà amb 30kW de plaques fotovoltaïques (150 plaques de 200W), un generador de gas natural de 10kW, 96 bateries de 1.5kAh i un inversor de 9kW. En aquest cas, també quedarà descartada la possibilitat d'utilitzar aerogeneradors.

El cost de l'energia és de 0,287€/kWh, amb una inversió inicial de 92.440€ i un VAN de 117.978€. El cost de l'energia és lleugerament més car que a la xarxa de Beuda, ja que el la fracció renovable també és major, fent que el nombre de bateries necessàries també sigui proporcionalment major.

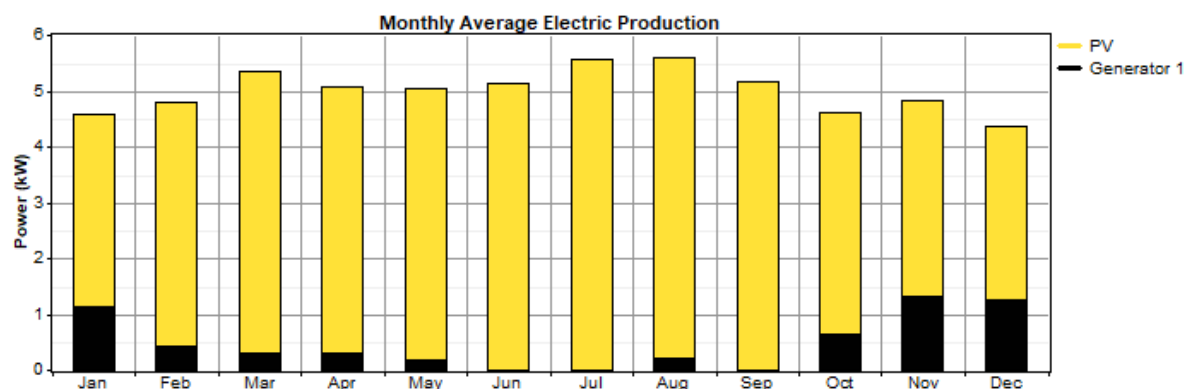


Fig. 5.31 Recursos utilitzats a Lligordà

En aquesta configuració, el generador també funcionarà com a suport del sistema en els moments de més demanda, aconseguint així fracció renovable d'un 90.3%, sense talls de subministrament. Tal com s'observa a la figura 5.31, als mesos de juny i juliol (coincidint amb el moment de l'any amb més incidència solar) i setembre, la xarxa funcionarà exclusivament amb la generació fotovoltaica.

La generació a Lligordà (Fig. 5.32), és encara més neta que al cas de Beuda. Amb una generació de 39.643 kWh/any i unes emissions de 2.373 kg CO<sub>2</sub>/any, el factor obtingut és de 0,05986 kg CO<sub>2</sub>/kWh, molt inferior al cas anterior i a la xarxa.

Production	kWh/yr	%
PV array	39,643	90
Generator 1	4,268	10
Total	43,911	100

Quantity	kWh/yr	%
Excess electricity	5,005	11.4
Unmet electric load	0.0000291	0.0
Capacity shortage	0.00	0.0

Quantity	Value
Renewable fraction	0.903

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	2,373

Fig. 5.32 Generació a Lligordà

### 5.3.3. Palera

	PV (kW)	Label (kW)	H1500	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Natural gas (m3)	Label (hrs)	Batt. Lf. (yr)
	12	10	48	8	\$ 45,810	891	\$ 57,195	0.338	0.90	543	183	20.0

Fig. 5.33 Resultats de l'optimització a Palera

La instal·lació de Palera, comptarà amb plaques fotovoltaïques per valor de 12kW (60 plaques de 200W), un generador també de gas natural de 10kW, 48 bateries 1.5kAh en dues línies i un convertidor de 8kW.

El cost de l'energia és de 0,338€/kWh, amb una inversió inicial de 45.810€ i un VAN de 57.195€. El cost de l'energia és més car que als casos anteriors per dos motius: el baix nombre d'habitants i l'elevada fracció renovable. Al ser aquest el nucli més petit del municipi amb només 14 habitants, els costos fixos de la instal·lació fan incrementar el preu de l'energia. Tot i això, en comparació al preu de la xarxa, el preu del kWh és només 5 cèntims superior.

Pot observar-se (Fig. 5.34) que aquesta configuració podria funcionar durant els mesos d'estiu únicament amb l'energia generada per les plaques, i el generador tindrà més pes als mesos de menys incidència solar.

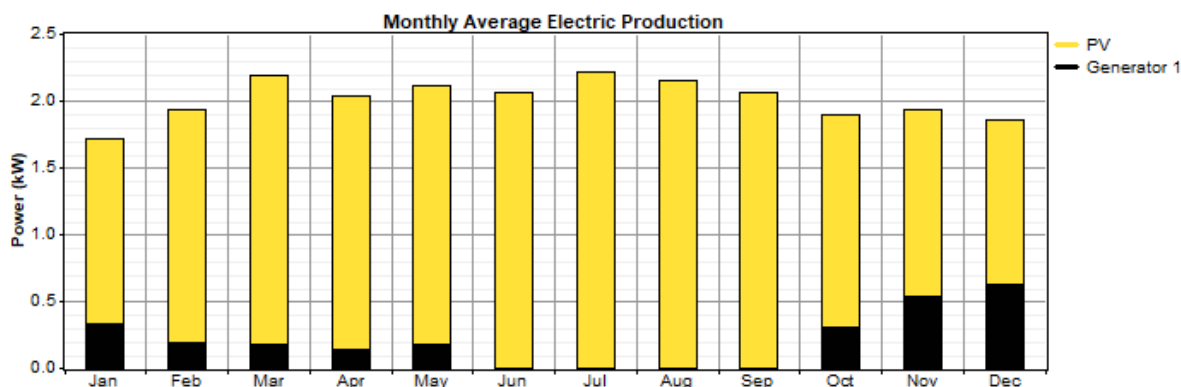


Fig. 5.34 Recursos utilitzats a Palera

La producció elèctrica serà de 17.687kWh/any amb una fracció renovable del 89,7%, que produeix 1.047kg/any de diòxid de carboni. Així doncs, la generació tindrà un factor d'emissions de 0.0592 kg CO<sub>2</sub>/kWh, més baix que tots els sistemes anteriors.

Production	kWh/yr	%
PV array	15,857	90
Generator 1	1,829	10
Total	17,687	100
Quantity	kWh/yr	%
Excess electricity	1,543	8.73
Unmet electric load	0.0000129	0.00
Capacity shortage	0.00	0.00
Quantity	Value	
Renewable fraction	0.897	
Pollutant	Emissions (kg/yr)	
Carbon dioxide	1,047	

Fig. 5.35 Generació a Palera

### 5.3.4. Segueró

	PV (kW)	Label (kW)	H1500	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Natural gas (m3)	Label (hrs)	Batt. Lf. (yr)
	44	10	120	15	\$ 120,630	4,228	\$ 174,674	0.267	0.86	4,092	962	20.0

Fig. 5.36 Resultats de l'optimització a Beuda

Finalment, la instal·lació de Segueró comptarà amb plaques fotovoltaïques per valor de 44kW (220 plaques de 200W), un generador també de gas natural de 10kW, 120 bateries 1.5kAh en cinc línies i un convertidor de 15kW.

El cost de l'energia és de 0,267€/kWh, amb una inversió inicial de 120.630€ i un VAN de 174.674€. El cost de l'energia és el segon més barat després de Beuda, també més barat que la xarxa, fet atribuïble a tenir també una fracció renovable més baixa que els anteriors.

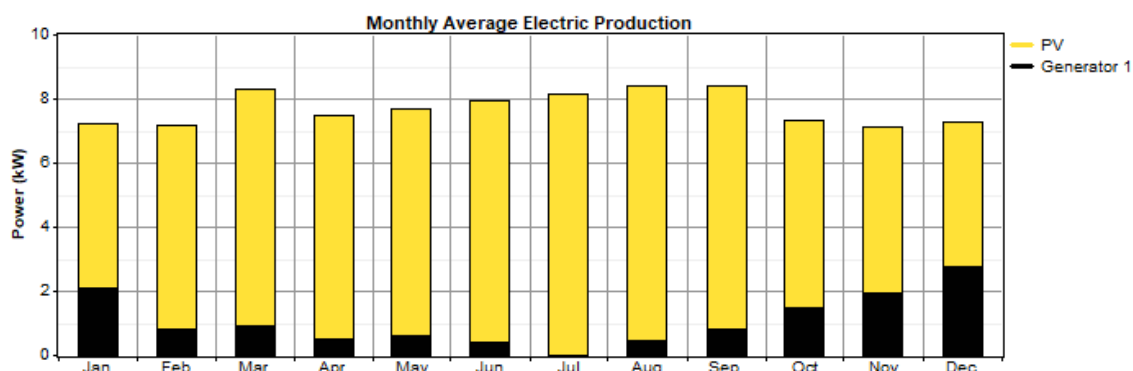


Fig. 5.37 Recursos utilitzats a Segueró



Com mostra el gràfic (Fig. 5.37), aquest sistema té una dependència del gas natural més gran que els anteriors, reduint així la fracció renovable fins al 86%. L'únic mes que el sistema s'alimentarà únicament amb la producció de les plaques solars serà juny.

Production	kWh/yr	%
PV array	58,148	86
Generator 1	9,427	14
Total	67,575	100

Quantity	kWh/yr	%
Excess electricity	6,277	9.29
Unmet electric load	0.0000632	0.00
Capacity shortage	0.00	0.00

Quantity	Value
Renewable fraction	0.860

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	7,892

Fig. 5.38 Generació a Segueró

La producció elèctrica total a Segueró serà de 67.575 kWh/any, amb una emissió de 7.892kg CO<sub>2</sub>/any, i per tant un factor d'emissions de 0,1168 kg CO<sub>2</sub>/kWh (un 70% inferior a la xarxa elèctrica convencional).

## 5.4. Anàlisi de sensibilitat

L'anàlisi de sensibilitat es realitzarà estudiant els canvis en la demanda i en els recursos energètics per a determinar el comportament de la microxarxa en aquestes condicions. Al ser els quatre sistemes molt semblants, s'estudiarà només el cas del nucli de Beuda.

### 5.4.1. Anàlisi de sensibilitat de la demanda

Per a determinar com afecten els canvis en la demanda en el sistema, cal realitzar un anàlisi de sensibilitat suposant un increment i un decrement del 10% i 20% sobre la demanda calculada.

Es realitzarà sobre el municipi de Beuda, degut a la similitud dels resultats. L'anàlisi de sensibilitat (Fig. 5.39 i 5.40) mostra com els canvis sobre la demanda afecten a la producció del generador, ja que tota l'energia de les plaques fotovoltaiques ja s'utilitzava. Quan la

demanda incrementa 10% i el 20% el consum de gas natural augmenta molt, encarint així el cost de producció de l'energia.

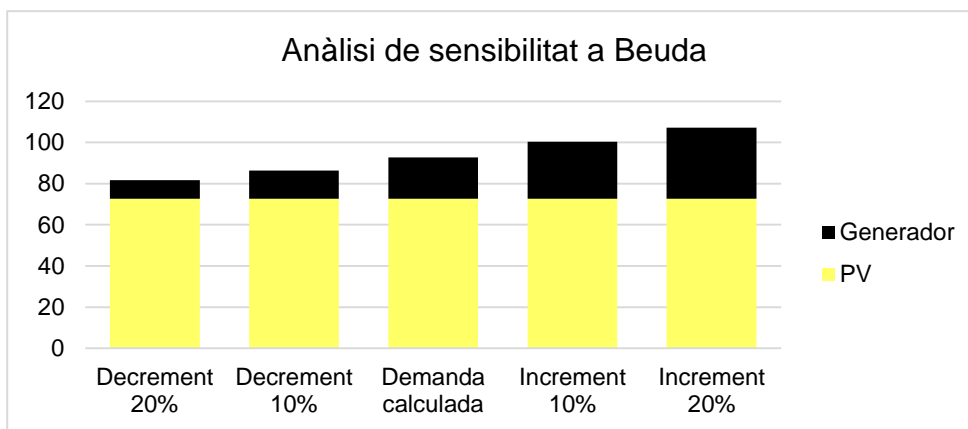


Fig. 5.39 Anàlisi de sensibilitat de la demanda a Beuda (1)

	Consum kWh/d	PV MWh/any	Generador MWh/any	Fracció renovable	COE €/kWh	Emissions kg CO <sub>2</sub> /kWh
Decrement 20%	170,232	72,67	8,98	89,0%	0,274	0,07699
Decrement 10%	191,511	72,67	13,62	84,2%	0,260	0,11050
Demanda	212,79	72,67	20,1	78,3%	0,255	0,15063
Increment 10%	234,069	72,67	27,63	72,5%	0,254	0,19143
Increment 20%	255,348	72,67	34,5	67,8%	0,252	0,22374

Fig. 5.40 Anàlisi de sensibilitat de la demanda a Beuda (2)

Com mostra l'anàlisi de sensibilitat del sistema (Fig. 5.40), la tendència del cost de l'energia disminueix amb l'increment proporcional del gas natural (i la disminució de la fracció renovable). La fluctuació del COE és petita i en el cas de Beuda, mai arriba a ser superior al cost de la xarxa. Tot i incrementar un 20% la demanda, les emissions continuarien sent inferiors a les de l'energia de la xarxa.

Al tenir el generador de suport, els sistemes podran resistir increments puntuals de demanda. Si un cop instal·lat el sistema, es veïés que la demanda és superior a l'esperada, podria tornar-se a calcular la configuració de la xarxa per augmentar la fracció renovable. Si contràriament aquesta energia és inferior, es podrà tornar a optimitzar la xarxa podent-la disminuir, o mantenir-la arribant així a fraccions renovables molt altes.

### 5.4.2. Anàlisi de sensibilitat dels recursos energètics

Els recursos energètics també poden fer canviar el comportament del sistema. És important l'estudi de fets com les variacions en el preu del gas natural, o la velocitat mitjana del vent.

	Preu €/m <sup>3</sup>	PV kW	Bateries u	Fracció renovable	COE €/kWh	Emissions kg CO <sub>2</sub> /kWh	Consum GN m <sup>3</sup>
Decrement 10%	0,527	60	168	81,9%	0,247	0,1566	6.307
Preu real	0,585	55	168	78,3%	0,255	0,1800	7.245
Increment 10%	0,644	75	216	92,4%	0,277	0,0753	3.034

*Fig. 5.41 Anàlisi de sensibilitat del preu del gas natural*

Tal com mostra l'anàlisi de sensibilitat del preu del gas natural (Fig 5.41), els increments del preu fan canviar el nombre de dispositius del sistema, augmentant en el nombre de plaques fotovoltaïques i de bateries, i fan disminuir bruscament (més d'un 58%) el consum d'aquest. A més, s'obté una fracció renovable molt més elevada i un nivell d'emissions molt baix. Aquest fet també causa un increment en el cost de l'energia.

D'altra banda, quan el preu disminueix el consum de gas natural també presenta una lleugera disminució, augmentant-se també el nombre de plaques solars emprades en la instal·lació. En aquest cas, el cost de l'energia també disminueix, i el nivell d'emissions es situa per sota que en el cas del preu real fixat.

Finalment s'ha realitzat l'anàlisi de sensibilitat del recurs eòlic, per comprovar si a un emplaçament amb un potencial eòlic un 10% o 20% superior, aquest tindria un nivell de producció suficient. L'anàlisi ha determinat que en cap dels casos, aquest recurs és suficient per a la generació elèctrica.

## 5.5. Estudi econòmic

L'objectiu de la optimització, és obtenir la xarxa amb el menor cost total, i el menor COE (cost de generació de l'energia). Per calcular-ho, al realitzar l'estudi econòmic s'ha considerat el cost de cada dispositiu, el cost de reemplaçament i el cost d'operació i manteniment (O&M).

Dispositiu	Especificacions	Cost	Cost reemplaçament	Cost O&M
Plaques solars	200W	200€	180€	1€/u·any
Generador	10kW	4.450€	4.450€	0,1€/h
Bateries	1500 Ah (2 V)	585€	585€	2€/u·any
Inversor	4kW	1.330€	1.200€	0€/any

Fig. 5.42 Cost del dispositiu, del reemplaçament i d'O&amp;M

La vida útil dels dispositius és limitada, i aquests hauran de ser reemplaçats cada 15 (l'inversor) o 20 anys (plaques solars i bateries). A més, per tots els dispositius s'haurà de tenir en compte el cost d'operació i manteniment. Aquestes tasques són de gran importància per exemple en el cas de les plaques solars, on la brutícia sobre la placa pot fer disminuir el rendiment energètic [10].

	Beuda	Lligordà	Palera	Segueró
PV	55.000€	30.000€	12.000€	44.000€
Generador	4.680€	4.450€	4.000€	4.000€
Bateries	98.280€	56.160€	28.080€	70.200€
Inversor	3.330€	1.830€	1.730€	2.430€
TOTAL	161.290€	92.440€	45.810€	120.630€

Fig. 5.43 Cost dels dispositius

Com podem observar a la figura 5.44, al cost total a Beuda les bateries representen el major percentatge de la instal·lació. Amb la incorporació del generador de gas natural, s'aconsegueix disminuir-ne el nombre, podent generar també en hores sense incidència solar.

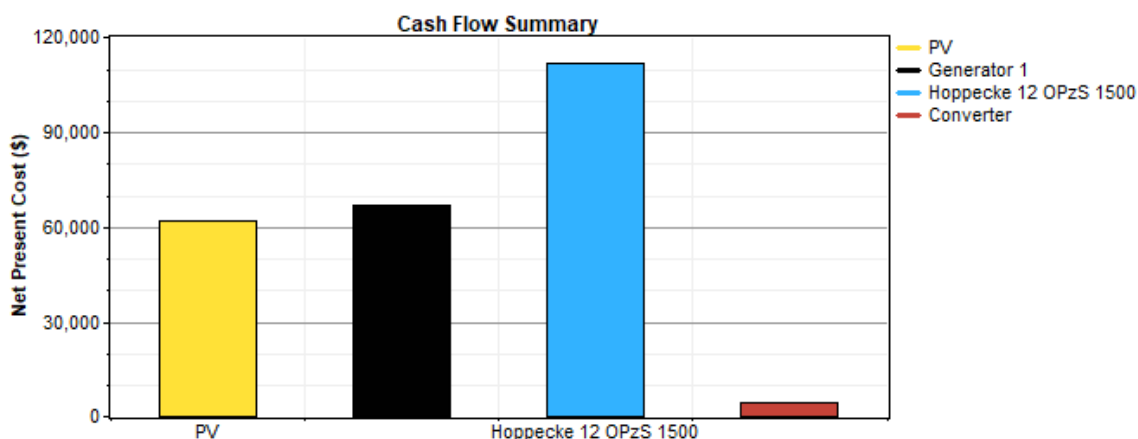


Fig. 5.44 Cost dels dispositius a Beuda

HOMER també realitza un estudi econòmic, que contempla el punt de retorn de la inversió indicat, basant-se en la vida útil de cada element, el cost de reemplaçament i el cost de manteniment. En el nostre cas, el retorn es produirà als 25 anys per als 4 nuclis.

La taxa d'interès de la inversió s'ha fixat en un 6%, sent aquest el percentatge usualment pagat en els projectes del sector de l'energia [12]. Aquesta, és notablement alta en comparació en altre tipus de projectes, ja que en aquest tipus de projectes s'espera un retorn alt de la inversió.

El VAN d'un sistema és el valor de tots els costos que s'haurà de fer càrrec durant la seva vida útil, menys el valor actual de tots els ingressos que guanyarà durant tota la seva vida. Aquests costos inclouen en aquest cas els costos de capital, els costos de substitució, els costos d'O&M, els costos de combustible i les sancions d'emissions (si n'hi hagués). Es calcula com:

	Beuda	Lligordà	Palera	Segueró
Cost inicial	161.290 €	92.440 €	45.810 €	120.630 €
VAN (Valor Actual Net)	252.820 €	117.978 €	57.195 €	174.674 €
COE	0,255 €/kW	0,287 €/kW	0,338 €/kW	0,267 €/kW
Cost total/hab	3.046 €/hab	3.469 €/hab	4.085 €/hab	3.119 €/hab

Fig. 5.45 Cost inicial, VAN, COE i Cost per habitant

$$C_{NPC} = C_{ann,tot} / \frac{i(i+1)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (Eq. 5.2)$$

On  $i$  és la taxa d'interès i  $N$  l'horitzó del projecte.

Al ser els 4 nuclis molt semblants en quant a resultats, s'analitzarà només Beuda. En aquest cas, el VAN és molt superior al cost inicial, la qual cosa es deu al fet d'haver de consumir combustible fòssil i a haver de substituir als 15 anys l'inversor, i als 20 anys les bateries i les plaques fotovoltaïques.

Component	Cost	Substitució	O&M	Gas Natural	Estalviat	Total
PV	55.000 €	15.434 €	3.515 €	0 €	-8.650 €	65.300 €
Generador	4.680 €	6.265 €	2.572 €	54.178 €	-705 €	66.991 €
Bateries	98.280 €	30.644 €	4.295 €	0 €	-17.174 €	116.045 €
Inversor	3.330 €	1.419 €	0 €	0 €	-264 €	4.485 €
Sistema Total	161.290 €	53.763 €	10.383 €	54.178 €	-26.794 €	252.820 €

Fig. 5.46 Cost total a Beuda

## 6. Pressupost

En aquest capítol s'explicarà els costos associats a la realització del projecte.

### 6.1. Costos de la realització del projecte

En aquest estudi s'ha estudiat els elements necessaris per a la generació elèctrica aïllada, sense tenir en compte el muntatge i instal·lació. Per aquest motiu, al pressupost només hi figurarà els costos dels dispositius.

#### Beuda

Descripció	Unitats	Preu unitari	Total
<b>PLAQUES FOTOVOLTAIQUES</b> Plaques fotovoltaïques policristal·lines de 200W de capacitat.	275	200€	55.000,00€
<b>BATERIES</b> Hoppecke 12 OpZs 1500 Bateria estacionària de 12V, formada per 6 elements de 2V connectats en sèrie. Capacitat de 1500 Ah (3kWh). Vida útil de 7820 cicles (20% SOC)	168	585,10€	98.296,8€
<b>INVERSORS</b> SMA Sunny Boy Inversor fotovoltaic disponible en 3kW, 4kW i 5kW. Connectivitat a través de PC o smartphone. 16kg.	0 1 4	1200€ 1330€ 1430€	7.050,00€
<b>GENERADOR</b> Himoinsa HGY-12 Trifàsic, 50Hz, Gas Natural, Refrigerat per aigua. 10kW de potència.	1	4450€	4450€
<b>TOTAL INSTAL·LACIÓ (amb IVA)</b>			164.796.80€

Fig. 6.1 Pressupost de Beuda

#### Palera

Descripció	Unitats	Preu unitari	Total
<b>PLAQUES FOTOVOLTAIQUES</b> Plaques fotovoltaïques policristal·lines de 200W de capacitat.	60	200€	12.000,00€
<b>BATERIES</b> Hoppecke 12 OpZs 1500 Bateria estacionària de 12V, formada per 6 elements de 2V connectats en sèrie. Capacitat de 1500 Ah (3kWh). Vida útil de 7820 cicles (20% SOC)	48	585,10€	28.084,80€
<b>INVERSORS</b> SMA Sunny Boy	0	1200€	2660€

Inversor fotovoltaic disponible en 3kW, 4kW i 5kW. Connectivitat a través de PC o smartphone. 16kg.	2 0	1330€ 1430€	
<b>GENERADOR</b> Himoinsa HGY-12 Trifàsic, 50Hz, Gas Natural, Refrigerat per aigua. 10kW de potència.	10	4450€	4450€
<b>TOTAL INSTAL·LACIÓ (amb IVA)</b>			47.194,80€

Fig. 6.2 Pressupost de Palera

**Lligordà**

Descripció	Unitats	Preu unitari	Total
<b>PLAQUES FOTOVOLTAIQUES</b> Plaques fotovoltaïques policristal·lines de 200W de capacitat.	150	200€	30.000,00€
<b>BATERIES</b> Hoppecke 12 OpZs 1500 Bateria estacionària de 12V, formada per 6 elements de 2V connectats en sèrie. Capacitat de 1500 Ah (3kWh). Vida útil de 7820 cicles (20% SOC)	96	585,10€	56.169,60€
<b>INVERSORS</b> SMA Sunny Boy Inversor fotovoltaic disponible en 3kW, 4kW i 5kW. Connectivitat a través de PC o smartphone. 16kg.	0 0 2	1200€ 1330€ 1430€	2860,00€
<b>GENERADOR</b> Himoinsa HGY-12 Trifàsic, 50Hz, Gas Natural, Refrigerat per aigua. 10kW de potència.	1	4450€	4450,00€
<b>TOTAL INSTAL·LACIÓ (amb IVA)</b>			93.479,60€

Fig. 6.3 Pressupost de Lligordà

**Segueró**

Descripció	Unitats	Preu unitari	Total
<b>PLAQUES FOTOVOLTAIQUES</b> Plaques fotovoltaïques policristal·lines de 200W de capacitat.	220	200€	44.000,00€
<b>BATERIES</b> Hoppecke 12 OpZs 1500 Bateria estacionària de 12V, formada per 6 elements de 2V connectats en sèrie. Capacitat de 1500 Ah (3kWh). Vida útil de 7820 cicles (20% SOC)	120	585,10€	70.212,00€
<b>INVERSORS</b> SMA Sunny Boy Inversor fotovoltaic disponible en 3kW, 4kW i 5kW. Connectivitat a través de PC o smartphone. 16kg.	0 0 3	1200€ 1330€ 1430€	4.290,00€

<b>GENERADOR</b> Himoina HGY-12 Trifàsic, 50Hz, Gas Natural, Refrigerat per aigua. 10kW de potència.	1	4.450€	4.450€
<b>TOTAL INSTAL·LACIÓ (amb IVA)</b>			<b>122.952,00€</b>

Fig. 6.4 Pressupost de Segueró

Finalment cal afegir els costos de la realització del projecte. Al començament, una gran part del temps va ser invertida en l'aprenentatge del tractament de dades, de teoria de micro-xarxes i energies renovables i finalment del funcionament del software. Seguidament, es va realitzar la recerca de dades i el disseny del sistema òptim. La redacció de la memòria també ha estat un procés llarg, al qual s'ha hagut d'invertir més d'un 40% del temps. A més, s'han realitzat reunions de seguiment periòdiques durant tot el procés.

També es tindrà en compte l'import de el material necessitat per a realitzar el treball.

Tasca	Preu	Hores	Preu total
Aprenentatge	30 €/h	75	2.250,00 €
Recerca i tractament de dades	30 €/h	30 h	900,00 €
Disseny de la xarxa	30 €/h	75 h	2.250,00 €
Redacció de la memòria	30 €/h	130 h	3.900,00 €
Subtotal	30 €/h	310 h	9.300,00 €
IVA (21%)			1.953,00 €
<b>TOTAL</b>			<b>11.253,00 €</b>

Fig. 6.5 Pressupost del projecte

Concepte	Preu	Amortització	Temps d'ús	Cost total
Ordinador portàtil	675,89 €	10 anys	5 mesos	28,16 €
Disc dur extern 1.5TB	49,95 €	8 anys	5 mesos	2,60 €
<b>TOTAL (IVA inclòs)</b>				<b>30,76 €</b>

Fig. 6.6 Pressupost del material utilitzat

Es determina que el cost total de la realització del projecte és de 11.283,76 €.

## 6.2. Estudi de viabilitat del projecte

La viabilitat d'aquest projecte, estudiada des d'un punt de vista econòmic, és més cara que continuar consumint l'energia de la xarxa. Tal com s'ha pogut observar, la inversió és deficitària ja que no és capaç de retornar la inversió inicial. Tot i ser el cost de l'energia superior al cost de la xarxa, és un cost assumible.



Des del punt de vista de la realització, el projecte és totalment realitzable i capaç de generar un impacte molt positiu, al reduir les emissions derivades de la generació elèctrica en un 60%.

El la tendència del preu de les tecnologies renovables va a la baixa, i en alguns components, com en el cas de les bateries, els avenços tecnològics més recents han fet disminuir el seu preu en un 35% des de mitjans de 2018 [4]. Aquest fet mostra que tot i que el projecte no sigui econòmicament rendible ara mateix, si que ho serà en els pròxims anys quan el preu de les bateries (principal cost de la xarxa) sigui inferior, i el rendiment del conjunt de dispositius superior.

L'alternativa ecològica més senzilla a la generació renovable rural aïllada, donat que al poble ja hi ha connexió a la xarxa, és contractar el subministrament a una comercialitzadora que pugui garantir una producció 100% renovable. Actualment a Catalunya existeixen comercialitzadores com *Som Energia* que distribueixen electricitat lliure d'emissions ni residus nuclears [14]. Aquesta, es pot complementar amb l'autogeneració amb plaques solars, estalviant així l'ús de bateries i obtenint un sistema renovable més barat i sense emissions.

## 7. Estudi d'impacte ambiental i social

L'estudi de l'impacte ambiental es realitza per identificar els impactes del projecte a l'entorn, des del punt de vista ambiental i social. En aquest capítol es quantifiquen els impactes que el projecte produiria en cas de ser executat i se'n proposen solucions.

En l'execució del projecte, la major causa de l'impacte ambiental és la instal·lació del gran nombre de plaques fotovoltaïques i bateries necessàries. Tot i que el projecte no ha arribat a determinar la instal·lació dels elements, l'emplaçament d'aquests sempre es buscarà amb l'objectiu de que siguin poc visibles que creïn el mínim impacte visual a la zona. La integració de les plaques solars a les teulades i terrats que compleixin les necessitats, és una bona forma de reduir aquest impacte.

Un cop finalitzi la vida útil dels aparells, caldrà estudiar la normativa vigent de gestió d'aquest tipus de residus especials, per al seu degut reciclatge. En el cas de les bateries, al seu interior s'hi troben components contaminants com el cobalt o el liti, que poden ser extrets per al seu reciclatge.

El sistema de microxarxa proposat, contempla l'ús d'un generador de gas natural de 10kW. Aquest tindrà un impacte ambiental global positiu, ja que la generació d'aquest produeix menys contaminació que l'ús d'energia elèctrica convencional. Per altre banda, aquestes mateixes emissions constitueixen un impacte negatiu tant social com ambiental, empitjorant la qualitat de l'aire i per tant afectant la qualitat de vida dels habitants. Per aquest motiu, els generadors hauran de ser instal·lats en llocs apartats dels habitatges i zones molt transitades, assegurant la correcta ventilació i expulsió dels fums generats.

Finalment la instal·lació podria tenir un impacte social positiu, incrementat el grau d'implicació dels habitants en la consciència energètica i impulsant la capacitat de gestió cooperativa comunitària del sistema. Aquest fet estimularia la reducció del consum elèctric i de manera derivada les emissions produïdes pel generador.

## Conclusions

En aquest estudi s'ha analitzat la implantació d'un sistema autosuficient de generació elèctrica basat en energies renovables a Beuda, un poble de la Garrotxa. Aquest municipi format per quatre petits nuclis aïllats (Beuda, Palera, Lligordà i Segueró), va sol·licitar l'estudi a la universitat per determinar la viabilitat d'instal·lar una xarxa elèctrica aïllada d'autoconsum.

L'objectiu principal d'aquest treball ha estat estudiar la configuració òptima dels elements necessaris per a la instal·lació d'una microxarxa aïllada alimentada en la seva gran part per energies renovables, situada a una zona rural.

El primer objectiu ha estat l'avaluació de les fonts d'energia renovables disponibles al municipi, les quals s'han pogut obtenir mitjançant softwares especialitzats per a adquirir dades de precisió. Les dades obtingudes han mostrat que l'energia eòlica disponible a l'emplaçament no era suficient per a la generació elèctrica, amb una velocitat mitjana dels nuclis molt baixa i amb gran variabilitat en molts dels casos. En canvi, les dades de la incidència solar del poble determinen que el recurs serà vàlid per a la generació elèctrica.

Seguidament, es proposa realitzar un estudi de la demanda elèctrica per a determinar el perfil horari. La manca de dades obliga a crear un perfil de demanda sintètic amb la informació oferta per l'IDAE. Per a definir-la, es tenen en compte les característiques pròpies dels habitatges de la població, i la demanda elèctrica en ambients rurals. Es determina que els habitatges de Beuda tindran un consum de 5,19 kWh/dia, pics de consum màxim de 483W i un consum anual total de 1,893MWh/any.

Per a trobar la configuració òptima s'ha emprat el software HOMER, molt utilitzat en sistemes com aquest. Per a simplificar el sistema, s'ha realitzat l'estudi als quatre nuclis de forma aïllada i com a quatre càrregues úniques. Un cop optimitzat el model s'ha determinat que la millor configuració és el sistema híbrid format per plaques solars fotovoltaïques i generador de gas natural, amb sistema d'emmagatzematge. Depenent de la fracció renovable aconseguida a cada microxarxa el cost de l'energia canvia, sent més elevat a les configuracions amb més fracció renovable, per l'elevat cost d'aquests aparells.

L'estudi de sensibilitat s'ha realitzat suposant uns increments i decrements de la demanda en un 10% i un 20%. S'ha pogut comprovar que els sistemes son perfectament capaços d'absorbir aquestes variacions, variant la producció elèctrica generada amb gas natural. Com més gran és la demanda, més petita és la fracció renovable i més disminueix per tant el cost de l'energia.

En els quatre models s'ha pogut determinar que les emissions generades a cadascun son inferiors a les emissions mitjanes associades a l'energia de la xarxa elèctrica convencional. Això és degut a l'ús del gas natural com a combustible per el generador auxiliar, un combustible amb un factor d'emissions molt inferior tant al dièsel com a l'electricitat de la xarxa.

L'estudi econòmic realitzat mostra que la inversió realitzada per la instal·lació de les micro-xarxes es quedarà molt lluny de recuperar la inversió inicial. Tot i això, el cost final de l'energia generada no dista massa del cost de l'energia de la xarxa, sent en dos dels nuclis inferior.

La implementació d'una microxarxa aïllada, té encara avui en dia un preu molt elevat per el cost dels components (sobretot les bateries). Tot i això, la tendència dels preus de la tecnologia renovable mostra que en un futur pròxim, el cost de les bateries permetrà que micro-xarxes com aquestes siguin una inversió rentable.

Alternativament a la proposta inicial, podria estudiar-se la possibilitat de contractar el subministrament elèctric a una companyia que ofereixi electricitat 100% renovable, que oferís la possibilitat de generar energia mitjançant plaques fotovoltaïques. En aquest cas, els costos de la instal·lació serien inferiors als d'una microxarxa aïllada pel fet de no necessitar bateries, i l'impacte ambiental seria encara inferior pel fet de no emetre emissions de CO<sub>2</sub>, i necessitar menys dispositius.

## Agraïments

M'agradaria mostrar el meu agraïment al director d'aquest treball, Bruno Domenech, per oferir-me l'oportunitat de realitzar un projecte que s'adequa als meus interessos i per posar al meu abast els mitjans necessaris per a dur-lo a terme.

Agraeixo també al professor Alejandro López-González, codirector d'aquest treball, tota l'ajuda i suport oferts durant la realització d'aquest; així com pels coneixements que m'ha transmès, els quals m'han ajudat a resoldre els dubtes sorgits durant aquest procés.



## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] A. LÓPEZ-GONZÁLEZ, B. DOMENECH, L. FERRER-MARTÍ, *Sustainability and design assessment of rural hybrid microgrids in Venezuela*, 2018
- [2] A. LÓPEZ-GONZÁLEZ, B. DOMENECH, L. FERRER-MARTÍ, *Formative evaluation of sustainability in rural electrification programs from a management perspective: A case study from Venezuela*, 2018
- [3] A. LÓPEZ-GONZÁLEZ, *La energía solar como vector de superación de la pobreza energética en España*, 2019
- [4] BLOOMBERG NEF, *Battery Power's Latest Plunge in Costs Threatens Coal, Gas*, 2019
- [5] DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, *Wind Know How*, 2003  
<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/>
- [6] E. LUPÓN, *Electrònica: Dispositius fotoelectrònics*, 2018
- [7] IDAE. *Consumos del Sector Residencial en España. Resumen de Información Básica*.
- [8] IDAE. *Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España*.
- [9] IDAE. *Informe de precios energéticos regulados*
- [10] IDAE. *Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Aisladas de Red*, 2009
- [11] IMPERIAL INSTITUTE OF LONDON, *Incorporating Renewable Energy in Electricity Grids*.
- [12] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *World Energy Investment*, 2018
- [13] IRENA, *Renewable capacity statistics 2016*. Abu Dhabi. 2017.
- [14] J. BIGUES, *El llibre verd de Barcelona*, 2018

- [15] P. GILMAN, T. LAMBERT, *HOMER Energy v2.68*, 2012
- [16] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA, *Balance eléctrico nacional*, 2019
- [17] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA, *Informe del sistema eléctrico español*, 2018
- [18] S.C.BHATTACHARYYA, Z. CHMIEL, *Analysis of off-grid electricity system at Isle of Eigg (Scotland): Lessons for developing countries*, 2014